



Editora
Bernoulli



FÍSICA

Volume 06





FÍSICA Volume 06

Frente A

11 3 Energia Autor:
Francisco Pazzini
Couto

12 13 Impulso e
quantidade de
movimento Autor:
Francisco Pazzini
Couto

Frente B

11 23 Teoremas de
Torricelli e Stevin
Autor: Luiz Machado

12 35 Teoremas de
Pascal e Arquimedes
Autor: Luiz Machado

Frente C

11 45 Ondas
estacionárias Autor:

Lívio Ribeiro Canto

12 53 Som e efeito
Doppler Autor: Lívio
Ribeiro Canto

Sumário - Física Frente D 16

63 Radiação de corpo negro e quantização
da energia Autores: Luiz Machado Lívio
Ribeiro Canto

17 75 Dualidade
onda-partícula e efeito
fotoelétrico Autores:
Luiz Machado

Lívio Ribeiro Canto

18 89 Introdução à
Relatividade Especial
Autores: Luiz Machado

Lívio Ribeiro Canto

2 Coleção Estudo

FÍSICA MÓDULO FRENTE Energia 11

A

O conceito de energia, fundamental na Ciência Moderna, Logo:

é um dos conceitos científicos mais difundidos entre as pessoas. Todos possuem uma ideia, mesmo que $W = \Delta E = E_f - E_i$ seja vaga, do que seja energia. Neste módulo, estudaremos algumas formas de energia, como a energia cinética, Esse resultado é conhecido como Teorema do Trabalho e da

a energia potencial gravitacional e a energia potencial elástica. Energia Cinética. Apesar de termos realizado a demonstração

Veremos, também, algumas formas de transformação e para uma situação simples, é possível provar que a relação

de transferência de energia que acontecem em sistemas estabelecida entre o trabalho total realizado (W) e a variação

físicos e estudaremos o Princípio da Conservação da Energia da energia cinética (ΔE_c) é uma relação geral, válida para

forças conservativas ou não, de módulo constante ou

variável.

Mecânica. Finalizaremos o módulo apresentando o Princípio

O gráfico de energia cinética *versus* velocidade está da Conservação da Energia, um dos mais importantes da

Física. ² esboçado na figura a seguir. Observe que a energia

cinética é proporcional ao quadrado da velocidade, $E_c \propto v^2$,

Energia cinética (E_c e que E_c , portanto, é sempre positiva. $E_c \geq 0$)

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2$$

Todo corpo que se move possui uma energia associada ao

seu movimento, pois, para colocar um corpo em seu estado

de movimento, uma força foi exercida sobre ele, realizando trabalho e, consequentemente, transferindo-lhe energia. A energia associada ao movimento dos objetos é denominada

energia cinética (E_c). Um veículo em movimento possui energia cinética e esta pode ser

transformada em outra

forma de energia quando, por exemplo, o veículo colide com **EXERCÍCIO RESOLVIDO** um obstáculo qualquer.

Para determinar o modo como se calcula o valor da energia **01**. Um bloco de massa 0,5 kg está sujeito a uma força que

cinética de um corpo, considere um corpo de massa m que varia com a posição de acordo com o gráfico a seguir.

se move com velocidade inicial de módulo v_0 , sob a ação de

uma força resultante constante, de mesma direção que a F (N) velocidade, como mostra a figura a seguir:

$F \text{ (N)}$

$v \text{ (m/s)}$

$x \text{ (m)}$

0

0 10 20 30 $x \text{ (m)}$

Essa força realizará um trabalho W sobre o corpo, transferindo-lhe energia e acelerando-o da velocidade de Se o bloco partiu do repouso em $x = 0$, qual será sua

módulo v até a velocidade de módulo v_0 . a velocidade escalar, em m/s, quando x for igual a 30 m?

Resolução

$W = F \cdot d = ma \cdot d$ Sabemos que a área sob a curva do gráfico de força *versus*

Mas: deslocamento nos fornece o valor do trabalho realizado

v_2 por essa força. A área total sob a curva do gráfico é igual à —
 $= v_2 v_0 + 2ad = 0 \Rightarrow$ soma da área do triângulo (200 J) e do retângulo (200 J).

2

Ora, se o trabalho total realizado sobre o corpo foi de 400 J,

$\Rightarrow \left(\frac{1}{2} m v_2^2 \right)$ isso significa que o corpo recebeu 400 J de energia. Como $v_2 = v_0$ $\frac{1}{2} m v_2^2 = \frac{1}{2} m v_0^2 = 0$ ele estava inicialmente em repouso ($E = 0$), o valor de $\left(\frac{1}{2} m v_2^2 \right)$ sua energia cinética final será 400 J. Logo:

A expressão $\frac{1}{2} m v_2^2$, $\frac{1}{2} m v_2^2$ é denominada energia cinética do corpo. $E = 400 \text{ J} \Rightarrow 400 = \frac{1}{2} m v_2^2 \Rightarrow v_2 = 40 \text{ m/s}$

Editora Bernoulli 3

Frente A Módulo 11

Energia potencial gravitacional (E

) Por exemplo, seja uma mola ideal, de constante elástica k , presa na parede em uma de suas extremidades e livre na outra.

Outra forma de energia que comumente aparece em Seja x o valor do comprimento inicial da mola. Uma pessoa o

exercícios e em situações cotidianas é a energia potencial puxa a extremidade livre da mola, alongando-a até o

gravitacional. Ela está associada à posição que um corpo comprimento final x . ocupa em um campo gravitacional, e sua variação entre

dois pontos, A e B, pode ser definida pelo trabalho que x_0

Figura A

a força peso executa no deslocamento entre esses dois pontos. Considerando o campo gravitacional constante entre

A e B, teremos:



$$\Delta E = F \cdot d = mg(h - h_0) = mg\Delta h \quad \Delta x_{AB}$$

B x Figura B

g A deformação sofrida pela mola será, então, $\Delta x = x - x_0$

Nessa situação, a mola armazena uma energia potencial

elástica (E_p). Podemos determinar o valor da energia

potencial elástica armazenada na mola se utilizarmos o

gráfico de força elástica *versus* deformação. A área sob a

A curva do gráfico nos permite determinar o valor do trabalho

realizado pelas forças externas para deformar a mola do

Assim, tomando-se como referência um plano arbitrário ponto de alongamento nulo ao ponto de comprimento final.

$x_0 = 0$, que comumente será o solo, onde a energia potencial O valor desse trabalho é numericamente

igual ao valor da

gravitacional será zero, podemos calcular a energia potencial gravitacional de um ponto de altura h em relação a esse plano:

$$\Delta E = E_{\text{pgFinal}} - E_{\text{pgInicial}} = E_{\text{pg}} = mgh(h - 0) = mgh_{\text{pg}}$$

$$E = mgh_{\text{pg}}$$

A



O gráfico de energia potencial gravitacional *versus* altura

negativos de E_{pg} indicam apenas que o objeto está em uma posição abaixo do referencial adotado.

kx .

$$E_{\text{peF}} = W_{\text{peF}} \Rightarrow E_{\text{pg}} = \frac{1}{2} kx^2$$

$$E_2 = kx$$

$$E_{pe} = \frac{1}{2} kx^2$$

h

A energia potencial elástica é sempre positiva, apresentando um valor diretamente proporcional ao valor da constante

Energia potencial elástica ($E_{elástica}$ da mola (k) e sendo, também, diretamente)

pe mola. O gráfico a seguir mostra o comportamento da energia proporcional ao quadrado do valor da deformação Δx da

Ao puxarmos um arco (utilizado em arco e flecha), um elástico potencial elástica, E , em função da deformação da mola, $E_{pe} \Delta x$.

ou distendermos uma mola, estamos realizando trabalho sobre

um sistema. Para que tais eventos ocorram, é necessário exercer E_{pe} uma força, à qual está atrelado um deslocamento.

Arco de
parábola

$$0 \Delta x$$

Os valores negativos para a deformação da mola indicam que ela está sendo comprimida, e os valores positivos mostram que a mola está sendo distendida.

4 Coleção Estudo

E E₀₀ parábola Arco de

parábola

Energia

$$0 \ t' \ t \ 0 \ t' \ t$$

Energia Mecânica (E) E_m E_{m0} E_{pg}

Denominamos de energia mecânica (E) de um sistema

Princípio da Conservação da E_m a

soma das energias cinética e potencial que esse $E_{mc} + E_{mp} = E$

sistema possui em certa posição. Antes de enunciarmos E_c o Princípio da Conservação da Energia Mecânica, 0 t' t apresentaremos o conceito de sistema conservativo. Nesse tipo de sistema, há presença

apenas de forças. Caso existam forças dissipativas atuando sobre o

conservativas, que, ao executarem trabalho sobre um corpo, sistema, o valor da energia mecânica não permanecerá

não alteram a energia mecânica total do sistema. Por ora, constante. Na verdade, esse valor será reduzido, pois outras

é necessário você saber que as forças gravitacional (peso), formas de energia não mecânicas, como o calor e o som,

elétrica e elástica são conservativas. Assim, o Princípio da surgirão como consequência da dissipação da energia

Conservação da Energia Mecânica nos diz que, em sistemas mecânica do sistema. Desse modo, o valor da energia

conservativos, ou seja, em sistemas nos quais apenas a força mecânica final será menor que o valor da energia

peso, a força elástica ou a força elétrica realizam trabalho, mecânica inicial, e a diferença entre esses valores

refere-se justamente ao trabalho realizado pelas forças a energia mecânica total do sistema conserva-se. Observe

dissipativas. Matematicamente, podemos escrever que:

o exemplo a seguir, que ilustra esse princípio.

Consideremos uma esfera, solta de uma altura h , em queda $W = E - E_{\text{forças dissipativas}} - E_{\text{mfm}}$

livre, como representa a figura a seguir. Estão desenhadas

cinco posições da esfera, nas quais representamos com **Observação:** As equações da Cinemática nos permitem retângulos os valores da energia cinética (E) e da energia c resolver muitos problemas. Entretanto, sua aplicação

potencial gravitacional (E) em cada ponto. Observe que, $_{pg}$ está limitada às questões em que o valor da aceleração é

no ponto mais alto, a esfera apresenta apenas energia constante. Dessa forma, utilizando o Princípio da Conservação

potencial gravitacional. À medida que a esfera cai, o valor da Energia Mecânica, problemas cuja solução não poderia

da E diminui; a essa diminuição da energia potencial ser encontrada pelo estudo dos movimentos uniformemente $_{pg}$

gravitacional corresponde um aumento da energia cinética acelerados podem agora ser resolvidos.

FÍSICA da esfera. Quando a esfera chegar ao solo (h

$= 0$), toda

sua energia potencial gravitacional terá sido

convertida em **EXERCÍCIOS**

RESOLVIDOS energia cinética.

02. (UFPE) Uma massa m está presa na extremidade de uma

E mola de massa desprezível e constante elástica conhecida. p

A massa oscila em torno da sua posição de equilíbrio $x = 0$,

E_c com amplitude A , sobre uma superfície horizontal sem

atrito. Qual dos gráficos a seguir representa melhor a

E energia cinética E_c , em função da posição x da massa? $c p$

E_c A) E_c D) E_c

E_p

E_c

E_c E_p 0 x 0 $-A$ A $-A$ A x

c

B) E_c E) E_c E_c

Graficamente, podemos representar a situação da seguinte

forma:

$$E\,E-A\,0\,0\,A\,x-A\,A\,x$$

c p

E Arco de E 0 0 C) E parábola c Arco de
parábola

$$0\,0\,t'\,t\,0\,t'\,t-A\,A\,x$$

$$E_m \text{ Editora Bernoulli } E_m \text{ 5 } E_0 E_{pg}$$



$$E = E + E_{m\,cp}$$



Frente A Módulo 11

Resolução: que existem várias formas do Princípio da Conservação

A situação descrita anteriormente pode ser representada da Energia, há as que se aplicam a sistemas menores e pela figura que se segue: fechados, e há o Princípio da

Conservação da Energia em sua

forma geral, que diz que a energia do Universo é constante.

$$v = 0 \quad v = 0$$

O Princípio da Conservação da Energia comprova que a

energia que recebemos do Sol não apenas se transforma

em inúmeras outras formas de energia (como eólica, fóssil,

térmica, etc.), mas também se conserva, isto é, não é

Como temos a presença apenas de forças conservativas,

“gasta” ou “consumida”, e sim apenas convertida em outras

a energia mecânica total se conserva. Como o movimento

se dá apenas no plano horizontal: $E_m = E_c + E_{pe}$.
sistema e nem por quanto tempo o observamos, a energia formas de energia. Não importa o quão complexo é um

Nos pontos de amplitude máxima (+ A e -A), o valor da total em um sistema fechado sempre se conserva.

velocidade e, conseqüentemente, o da energia cinética

são nulos, já que há mudança no sentido da velocidade. A energia elétrica que utilizamos no Brasil provém, em sua

No ponto $x = 0$, maioria, de usinas hidroelétricas. Quando utilizamos uma $E_{pe} = 0$, já que a mola não está queda-d'água para gerar energia nessas usinas, estamos distendida, e $E = E$, tendo assim a energia cinética, E_{cm} apenas aproveitando parte da energia potencial gravitacional e consequentemente a velocidade, seu valor máximo. da água para transformá-la em energia elétrica, que, Ainda por conservação da energia, $E = E - E = E - kx^2_{cmpe} / 2$. m por sua vez, será convertida em luz, som, calor, etc. Como E_{Mm} e k são constantes positivas, o gráfico tem a



forma de uma parábola de concavidade voltada para baixo ($a = -k/2 < 0$). Assim, o gráfico que melhor representa a energia cinética em função da posição x da massa é o da alternativa A.

03. (UNESP) Um bloco de massa m desliza sem atrito sobre a superfície indicada na figura a seguir.

m h

Se g é a aceleração da gravidade, a velocidade mínima V e Commons que o bloco deve ter para alcançar a altura h é

Creativ

A) $2\sqrt{gh}$. C) $\sqrt{2gh}$. E) $2\sqrt{2gh}$

2 EXERCÍCIO RESOLVIDO

B) $\sqrt{2gh}$. D) $\sqrt{gh}$.

2 04. (UFMG) Um bloco de massa $0,20 \text{ kg}$ desce deslizando

Resolução: sobre a superfície mostrada na figura.

O enunciado afirma que o sistema é conservativo, pois não

apresenta forças de atrito. Inicialmente, o bloco apresenta $A = 2 \text{ m/s}$ energia cinética dada por $E_c = \frac{1}{2}mv^2$. Ao subir a rampa, a energia cinética diminui, e a energia potencial

gravitacional do bloco aumenta da mesma quantidade. E B C

Deseja-se determinar a velocidade mínima inicial para que

o bloco chegue ao topo da rampa. Logo, ele pode chegar lá

com velocidade zero, isto é, com toda sua energia cinética No ponto A, a 60 cm acima do plano horizontal EBC,

convertida em energia potencial gravitacional. Então: o bloco tem uma velocidade de $2,0 \text{ m/s}$ e, ao passar

pelo ponto B, sua velocidade é de $3,0 \text{ m/s}$. Considere

$$E = E \Rightarrow mv^2/2 = mgh \Rightarrow v = \sqrt{2gh} = 10 \text{ m/s}.$$

Princípio da Conservação da Energia

A) Mostrar, usando conceitos relacionados à energia, que,

entre os pontos A e B, existe atrito entre o bloco e a

As ciências da natureza estruturam-se sobre princípios, superfície.

afirmativas que não podem ser comprovadas diretamente, mas B) Determinar o trabalho realizado pela força de atrito

que um grande número de fenômenos levou os estudiosos a que atua no bloco entre os pontos A e B.

considerá-las como “verdades” científicas. Um desses princípios C) Determinar o valor do coeficiente de atrito entre a

é o Princípio da Conservação da Energia, em sua forma geral, superfície horizontal e o bloco, sabendo-se que este

e não apenas em sua forma mecânica. É interessante ressaltar chega ao repouso no ponto C, distante 90 cm de B.

6 Coleção Estudo

Energia

Resolução: 03. (UEL-PR) A figura 1 representa um sistema composto

A) Se existe atrito na rampa, então a energia mecânica tem de três esferas de mesma massa unidas por três molas

seu valor reduzido. Vamos determinar o valor da energia idênticas. O sistema é posto a oscilar, deslocando-se entre

mecânica nos pontos A e B e comparar seus valores: as posições indicadas nas figuras 2 e 3.

$$E_{mA} = \frac{1}{2}mv_A^2 = E_c + E_{pg}$$

$$= 0 + mgh = 0,2 \cdot 10 \cdot 0,6$$

$$= 1,2 \text{ J}$$

$$\Rightarrow E = 0,4 \text{ J} + 1,2 \text{ J} = 1,6 \text{ J}$$

$$E = E = \frac{1}{2}mv_B^2 = 0,9 \text{ J}$$

$$v_B = 1,3 \text{ m/s}$$

Tendo em vista que a energia mecânica do bloco não

se conserva, conclui-se que há atrito entre os pontos A e B da superfície.

Pode-se dizer que a energia potencial elástica máxima

B) O trabalho realizado pela força de atrito é dado pela

do sistema ocorre

diferença entre os valores da energia mecânica do

bloco nos pontos A e B. Logo, o trabalho realizado A) somente na posição da figura 1. pela força de atrito entre os pontos A e B é dado por:

B) somente na posição da figura 2.

$$W = E - E = -0,7 \text{ J}$$

C) somente na

posição da figura 3.

C) O trabalho realizado pela força de atrito, que é a

D) nas posições das figuras 1 e 2.

força resultante, sobre o bloco entre os pontos B e C

é igual à variação da energia cinética do bloco entre E) nas posições das figuras 2 e 3. os pontos B e C. Logo:

$W = \Delta E_{\text{atCBC}}$ **04.** (FCMMG) Uma montanha-russa tem a forma da figura a

$\Rightarrow -N \cdot \mu \cdot (0,90) = 0 - 0,9$ seguir. Um carrinho desliza em seus trilhos, considerados

$\Rightarrow -0,20 \cdot 10 \cdot \mu(0,90) = -0,9$ com atrito desprezível, passando pelos diversos pontos

$\Rightarrow 1, 2, 3$ e 4 , cujas alturas são, respectivamente, $d, d/2, \mu = \blacklozenge = 0,5$

$3d/4$ e 0 . O carrinho tem massa m e passa pelo ponto 1 **FÍSICA**

EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO com energia cinética igual a $mgd/2$.

01. (FEI-SP) O gráfico a seguir é uma reta e representa

a variação da força resultante que atua em um corpo

de $1,2 \text{ kg}$ em função do deslocamento. Sabe-se que a

velocidade na posição $x = 2 \text{ m}$ é de 4 m/s . Qual é a 2

$d \ 3$

velocidade do corpo na posição $x = 4 \text{ m}$?

$3d/4$

$$10 d = 0$$

Três alunos fizeram as seguintes afirmações sobre essa

situação:

0 5 x (m) **Josefina** – A energia cinética do carrinho no ponto 2 é

A) igual a mgd. 10 m/s C) 8 m/s E) 9,6 m/s

B) 6 m/s D) 16 m/s **Gabriel** – A energia potencial gravitacional do carrinho

no ponto 3 é igual à sua energia cinética.

02. (PUC Minas) Uma bola é arremessada verticalmente para

Rosana – A energia mecânica do carrinho no ponto 4 é

baixo, do alto de um edifício. No ponto de lançamento,

igual a 3mgd/2.

a bola possui uma energia potencial $E_P = 10 \text{ J}$ e uma

energia cinética E_C Pode-se afirmar que $E_C = 5,0 \text{ J}$. A resistência do ar no local

da experiência não pode ser desprezada. Na metade da A) apenas Gabriel fez afirmação correta.

altura, a energia potencial é

A) igual a 15 J. B) apenas Josefina fez afirmação correta. D) igual a 10 J.

B) menor que 5,0 J. C) apenas Josefina e Rosana fizeram afirmações corretas. E) maior que 15 J.

C) igual a 5,0 J. D) os três alunos fizeram afirmações corretas.

Frente A Módulo 11

05. (FCMMG) Um ciclista se move a $6,0 \text{ m/s}$ quando, então, 08. A energia potencial gravitacional permanece constante

desce uma rua cujo desnível é de $3,0 \text{ m}$, chegando à sua em todo o percurso do bloco.

base com 12 m/s , como mostra a figura. 16. A energia cinética do bloco não se conserva durante

o
movim

$6,0 \text{ m/s}$

32. O bloco sempre descera com velocidade constante,
pois está submetido a forças constantes.

$3,0 \text{ m}$ 12 m/s 64. A Segunda Lei de Newton não pode ser aplicada ao movimento desse bloco, pois existem forças dissipativas atuando durante o movimento.

Soma
()

Com relação a essa situação, pode-se afirmar que

A) o trabalho realizado pelos atritos é igual à perda de **04.** (UFTM-MG) Um projétil é lançado obliquamente para

energia potencial do conjunto bicicleta-ciclista. cima.
Considere que o projétil retorna ao nível de onde

foi lançado. Desprezando a resistência do ar, pode-se

B) a variação da energia cinética do conjunto bicicleta-

afirmar
que

ciclista é apenas devido ao desnível da rua.

C) durante a descida, o ciclista pedalou, acrescentando A) o sistema projétil + Terra não é conservativo.

energia cinética ao conjunto bicicleta-ciclista. B) a variação da energia cinética do projétil é positiva.

D) os dados da situação mostram que o ciclista não C) a energia cinética do projétil é nula no ponto mais

pedalou durante a descida, pois sua energia mecânica alto da trajetória.

foi conservada. D) a energia mecânica do sistema projétil + Terra varia

EXERCÍCIOS PROPOSTOS durante o movimento.

E) o trabalho realizado pela força gravitacional no

01. deslocamento total do projétil é nulo. (FUVEST-SP) Um ciclista desce uma ladeira, com forte

vento contrário ao movimento. Pedalando vigorosamente, **05.** (UEL-PR) Uma partícula de massa 500 g, em movimento

ele consegue manter a velocidade constante. Pode-se, retilíneo, aumenta sua velocidade desde 6,0 m/s até

então, afirmar que a sua 10 m/s num percurso de 8,0 m. A força resultante sobre

A) energia cinética está aumentando. a partícula tem módulo, em newtons,

B) energia cinética está diminuindo. A) 16. C) 6. E) 2.

C) energia potencial gravitacional está aumentando.

B) 8. D) 4.

D) energia potencial gravitacional está diminuindo.

E) energia potencial gravitacional é constante. **06.**

(UFMG) Daniel e André, seu irmão, estão parados em um

02. tobogã, nas posições mostradas na figura: (PUC-Campinas-SP)
Um corpo de massa 12 kg está

submetido a diversas forças, cuja resultante F é André

constante. A velocidade do corpo num ponto M é de

4,0 m/s e num outro ponto N é de 7,0 m/s. O trabalho

Daniel

realizado pela força F no deslocamento de M para N é,

em joules, de

h

A) 33. C) 99. E) 396.

$h/2$

B) 36. D) 198.

03. (UFSC–2007) O bloco representado na figura a seguir Daniel tem o dobro do peso de André, e a altura em que desce a partir do repouso, do ponto A, sobre o caminho ele está, em relação ao solo, corresponde à metade da que apresenta atrito entre as superfícies de contato. altura em que está seu irmão. Em um certo instante, A linha horizontal AB passa pelos pontos A e B. os dois começam a escorregar pelo tobogã. Despreze as

forças
de
atrito.

A É **CORRETO** afirmar que, nessa situação, ao atingirem B

o nível do solo, André e Daniel terão

A) energias cinéticas diferentes e módulos de velocidades

diferen

Assinale a(s) proposição(ões) **CORRETA(S)**. B) energias cinéticas iguais e módulos de velocidades

01. O bloco certamente atingirá o ponto B. iguais.

02. A força de atrito realiza trabalho negativo durante C) energias cinéticas diferentes e módulos de velocidades

todo o percurso e faz diminuir a energia mecânica iguais.
do sistema. D) energias cinéticas iguais e módulos de
velocidades

04. Tanto a força peso como a força normal realizam trabalho.
diferentes.

8 Coleção Estudo

Energia

07. (EFOA-MG) Um bloco de massa 2,0 kg sobe a rampa **10.**
(UFMG) Em um laboratório de Física, Agostinho realiza o

ilustrada na figura adiante, comprimindo uma mola de experimento
representado, esquematicamente, na figura

constante elástica $k = 200 \text{ N/m}$ até parar em B. adiante.

K

B 1,40 m

A H

h

Sabe-se que a velocidade do bloco em A era $8,0 \text{ m/s}$ e que não houve quaisquer efeitos dissipativos no trecho entre os pontos A e B.

Considerando-se a aceleração da gravidade local igual a g , Esse bloco está ligado por um fio a um outro bloco L, e Agostinho segura o bloco K sobre uma mesa sem atrito.

10 m/s , pode-se afirmar que a compressão **MÁXIMA** que está sustentado por esse fio. Em um certo momento,

da mola terá sido Agostinho solta o bloco, e os blocos começam a se

A) $0,60 \text{ m}$. C) $0,50 \text{ m}$. E) $0,85 \text{ m}$. movimentar. O bloco L atinge o solo antes que o bloco K

B) $0,65 \text{ m}$. D) $0,80 \text{ m}$. chegue à extremidade da mesa. Despreze as forças

de
atrito.

08. (UFJF-MG) Um garoto brinca com uma mola espiral. Os blocos K e L são idênticos, e cada um tem massa m .

Ele coloca a mola em pé numa mesa e apoia um pequeno A altura da mesa é H , e o bloco L, inicialmente, está a

disco de plástico em cima da mola. Segurando a borda uma altura h do solo. A aceleração da gravidade é g .

do disco, ele comprime a mola, encurtando-a 5 mm .

Nessas condições, imediatamente antes de o bloco L

Após o garoto soltar os dedos, a mola projeta o disco

atingir o solo, a energia cinética do conjunto dos dois

100 mm para cima (contando da altura de lançamento;

blocos
é

veja a figura). Quanto subiria o disco se o garoto

comprimisse a mola por 10 mm? Suponha que toda energia A)
 $mg(H - h)$. C) mgH .

potencial da compressão da mola seja transferida para o B) mgh . D)
 $mg(H + h)$.

disco e que a mola seja ideal. Marque a resposta **CERTA**.

11. (EFOA-MG) Os blocos A e B, representados na figura a
FÍSICA seguir, estão inicialmente em repouso, têm massas M e
 m ,
respectivamente, e estão ligados por um fio inextensível
de massa desprezível.

100 mm

5 mm

A

A) 400 mm C) 100 mm E) 90 mm

B) 200 mm D) 80 mm B

09. (Unimontes-MG–2008) Um atleta de massa 87,5 kg, h
praticante de *bungee jumping* (veja as figuras), pula de
uma estrutura de 187 m de altura, preso a uma corda,

cujo comprimento natural (comparável ao comprimento Sabendo-se que não existe atrito entre o bloco A e a mesa,

de equilíbrio de uma mola) é 72 m e cujo coeficiente de que a massa da polia e a resistência do ar são desprezíveis

elasticidade é $k = 35 \text{ N/m}$ (comparável ao coeficiente e que a aceleração da gravidade no local é g , é **CORRETO**

de uma mola). Considerando que o rapaz se move em afirmar que, após o bloco B ter caído de uma altura h ,

queda livre enquanto a corda não começa a ser esticada, a energia cinética do bloco A é expressa por 2 num local onde $g = 10 \text{ m/s}^2$, a **MENOR** distância que ele

chegará do solo é 1 A) Mgh . 2



B)
 $\cdot 1$
 $gMmh$

2 $(M m +)$

C)
 $\cdot$

2gMmh

(M
m
+)

D)

.
gMmh

(M
m
+)

A) 50 m. B) 30 m. C) 40 m. D) 25 m. E) Mgh.

Editora Bernoulli 9

Frente A Módulo 11

12. (PUC Minas) A figura a seguir representa a trajetória de para converter o movimento horizontal do atleta (corrida)

uma bola de tênis quicando em um chão de cimento. em movimento vertical, sem perdas ou acréscimos

Os pontos 1, 4 e 7 são os pontos mais altos de cada de energia. Na análise de um desses saltos, foi obtida

trecho da trajetória. O ponto 2 está na mesma altura a sequência de imagens reproduzida anteriormente.

que o ponto 3, e o ponto 5 está na mesma altura que o Nesse caso, é possível estimar que a velocidade

ponto 6. Considere a bola como uma partícula, e considere **MÁXIMA** atingida pelo atleta, antes do salto, foi de,

desprezível o atrito com o ar. aproximadamente,

1 (Desconsidere os efeitos do trabalho muscular após o

início
do
salto.)

4 A) 4 m/s. D) 8 m/s.

7 B) 6 m/s. E) 9 m/s.

C)
7
m/
s.

2 3 5 6

15. (UFV-MG-2009) Uma pedra é lançada verticalmente para

Sobre essa situação, é **INCORRETO** afirmar que cima. Desprezando-se a resistência do ar, o gráfico que

A) a energia mecânica em 1 é maior que a energia representa **CORRETAMENTE** os comportamentos da

mecânica em 4. energia potencial gravitacional U e da energia cinética K

B) a energia potencial gravitacional em 1 é maior que a da pedra, em função do tempo t , é

energia potencial gravitacional em 4.

C) a energia cinética em 3 é igual à energia cinética em 2. A) C)

D) a energia mecânica em 4 é igual à energia mecânica $U + K$ em 3.

E) a energia mecânica em 7 é menor que a energia $K + U$ mecânica em 5. 0 0

0 t t 0

13. (UFC) Quando uma bola cai de uma certa altura, sua D) B) energia potencial E_p vai se transformando em energia E_k

cinética E_k . Considere $E = 0$ o nível do solo, onde a altura h é nula. Despreze a resistência do ar.

O gráfico que **MELHOR** representa as energias potencial E_p e cinética E_k em função da altura da bola, é

A) E_p (linha contínua) e E_k (linha tracejada), em h função da altura da bola, é

16. (UFJF-MG-2008) Um carrinho de massa m desliza ao longo de um circuito de uma montanha-russa, contendo

um *loop* de raio r . Tratando o carrinho como uma massa

puntiforme, e desprezando todo tipo de atrito,

Altura

B) E_p e E_k

P

Energia

E_k

Altura

h

14. (FUVEST-SP-2008)

Altura máxima

do centro de massa

A) **CALCULE** a velocidade mínima no ponto P para o

3,2 m carrinho não perder contato com a pista nesse ponto.

Centro de massa

do atleta B) **CALCULE** o valor mínimo da altura h , onde o carrinho

é solto do repouso, para percorrer o circuito, sem perder contato com a pista no ponto P.

0,8 m

C) Supondo-se que a altura de onde ele é solto do

No "salto com vara", um atleta corre segurando uma vara e, repouso é suficiente para fazer uma volta completa

com perícia e treino, consegue projetar seu corpo por cima no *loop*, **FAÇA** um diagrama das forças que atuam

de uma barra. Para uma estimativa da altura alcançada sobre o carrinho, quando ele passa pelo ponto Q,

nesses saltos, é possível considerar que a vara sirva apenas identificando cada uma das forças.

10 Coleção Estudo

Energia

17. (Unicamp-SP) Um famoso cientista, Dr. Vest B. Lando, **02.** (Enem-2006) A figura a seguir ilustra uma gangorra

dirige calmamente o seu automóvel de massa $m = 1\,000\text{ kg}$ de brinquedo feita com uma vela. A vela é acesa nas

pela estrada cujo perfil está mostrado na figura a seguir. duas extremidades e, inicialmente, deixa-se uma das

72 km/h (20 m/s), ele percebe uma pedra ocupando toda parafina da extremidade mais baixa provoca a fusão. A parafina da extremidade mais baixa da vela pinga mais a estrada na posição $x = 120$ m (ver figura). Se o Dr. Vest B. Na posição $x = 20$ m, quando sua velocidade vale extremidades mais baixa que a outra. A combustão da

Lando não acelerar ou acionar os freios, o automóvel parafina fundida resulta na diminuição da massa da vela rapidamente que na outra extremidade. O pingar da

(devido aos atritos internos e externos) chega na posição na extremidade mais baixa, o que ocasiona a inversão

da pedra com metade da energia cinética que teria caso das posições. Assim, enquanto a vela queima, oscilam

não houvesse qualquer dissipação de energia. as duas extremidades.

40

35

30

)

25

y (m 20

ra

Altu 15 Nesse brinquedo, observa-se a seguinte sequência de
10 transformações de energia:

5 potencial gravitacional A) Energia resultante de processo químico →
energia → energia cinética

0 B) Energia potencial gravitacional → energia elástica →

0 20 40 60 80 100 120 140 160 energia cinética

Posição x (m) C) Energia cinética → energia resultante de processo

químico → energia potencial gravitacional

A) Com qual velocidade o automóvel se chocará com a D) Energia mecânica → energia luminosa → energia

pedra se o Dr. Vest B. Lando não acelerar ou acionar potencial gravitacional

B) Que energia tem de ser dissipada com os freios luminosa → energia cinética os freios? E) Energia resultante do processo químico

→ energia **FÍSICA**

acionados para que o automóvel pare antes da pedra?

03. (Enem–2008) *A energia geotérmica tem sua origem no*

núcleo derretido da Terra, onde as temperaturas atingem

4 000 °C. Essa energia é primeiramente produzida pela

SEÇÃO ENEM *decomposição de materiais radiativos dentro do planeta.*

Em fontes geotérmicas, a água, aprisionada em um

reservatório subterrâneo, é aquecida pelas rochas ao

redor e fica submetida a altas pressões, podendo atingir

01. *temperaturas de até 370 °C sem entrar em ebulição.* (Enem–2005)

Observe a situação descrita na tirinha a

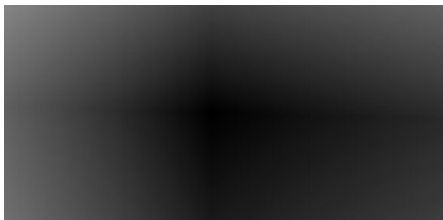
seguir. *Ao ser liberada na superfície, à pressão ambiente, ela*

se vaporiza e se resfria, formando fontes ou gêiseres.

O vapor de poços geotérmicos é separado da água e



é utilizado no funcionamento de turbinas para gerar



eletricidade. A água quente pode ser utilizada para aquecimento direto ou em usinas de dessalinização.

HINRICHS, Roger A.; KLEINBACH, Merlin. *Energia e meio ambiente*. Ed. ABDR (Adaptação).

CARUSO, Francisco; DAOU, Luisa. *Tirinhas de Física*, v. 2, CBPF, Depreende-se das informações anteriores que as usinas

geotérmicas

Rio de Janeiro, 2000.

A) utilizam a mesma fonte primária de energia que as

Assim que o menino lança a flecha, há transformação usinas nucleares, sendo, portanto, semelhantes os

riscos decorrentes de ambas.

caso, é de energia B) funcionam com base na conversão de energia potencial gravitacional em energia térmica. de um tipo de energia em outra. A transformação, nesse

A) potencial elástica em energia gravitacional. C) podem aproveitar a energia química transformada em

térmica no processo de dessalinização.

B) gravitacional em energia potencial.

D) assemelham-se às usinas nucleares no que diz

C) potencial elástica em energia cinética. respeito à conversão de energia térmica em cinética e,

depois, em elétrica.

D) cinética em energia potencial elástica.

E) transformam inicialmente a energia solar em energia

E) gravitacional em energia cinética. cinética e, depois, em energia térmica.

Editora Bernoulli 11

Frente A Módulo 11

04. (Enem–2006) Na avaliação da eficiência de usinas quanto

à produção e aos impactos ambientais, utilizam-se vários

Propostos

critérios, tais como: razão entre produção efetiva anual

de energia elétrica e potência instalada ou razão entre 01. D

potência instalada e área inundada pelo reservatório.

No quadro seguinte, esses parâmetros são aplicados às 02. D

duas maiores hidrelétricas do mundo: Itaipu, no Brasil,

03.
Soma
=
18

e Três Gargantas, na China.

04.
E

PARÂMETROS ITAIPU TRÊS GARGANTAS

05.
E

Potência instalada 12 600 MW 18 200 MW

06.
D

Produção efetiva 93 bilhões de 84 bilhões de
de energia elétrica kWh/ano kWh/ano 07. A

pelo reservatório Área inundada 08. A 1 400 km² 1 000 Km²

09.
D

Disponível em: .

Com base nessas informações, avalie as afirmativas que 10. B
se seguem.

11.
D

I. A energia elétrica gerada anualmente e a capacidade

nominal máxima de geração da hidrelétrica de Itaipu 12. C
são maiores que as da hidrelétrica de Três Gargantas.

II. Itaipu é mais eficiente que Três Gargantas no uso da 13. A
potência instalada na produção de energia elétrica.

14.
D

III. A razão entre potência instalada e área inundada

pelo reservatório é mais favorável na hidrelétrica Três 15.
B Gargantas do que em Itaipu.

É correto apenas o que se afirma em 16. A) $v_{\text{mín.}} = \sqrt{rg}$

B)
h
mín.
=
r

A) I. D) I e III.

C)

B) II. E) II e III. Q

C) III.

mg

GABARITO 17. A) $v = 20 \text{ m/s}$

B) $E = 2,0 \times 10^5 \text{ J}$

Fixação

01. B **Seção Enem**

02. C 01. C

03. E 02. A

04. D 03. D

05. C 04. E

12 Coleção Estudo

FÍSICA MÓDULO FRENTE Impulso e quantidade de 12 A movimento

O estudo dos diferentes movimentos observados na sistema, é muito importante delimitarmos quais são os

natureza passou a ser sistematizado no século XVII. corpos que fazem parte desse sistema, uma vez que isso

Os filósofos da natureza acreditavam que o movimento total definirá quais são as forças internas e externas que agem

do Universo, ou melhor, a quantidade de movimento total do sobre ele. Universo deveria permanecer

constante, uma vez que, para

Consideremos o sistema constituído por dois carros, A e B,

eles, o Universo era uma obra divina. Esses filósofos debatiam

de massas iguais, $m = 1\,000\text{ kg}$, ambos se movendo sobre que grandeza física deveria representar a quantidade

com velocidade de 10 m/s (36 km/h). O módulo da de movimento de um corpo: sua velocidade, o produto da

massa pela velocidade ou outra expressão qualquer. ⁴ quantidade de movimento de cada carro será igual a

$1,0 \times 10\text{ kg.m/s}$; porém, a quantidade de movimento

a quantidade de movimento (Q) e o impulso (I). e do sentido em que eles estiverem se movendo. A análise dessas grandezas revelou uma nova abordagem dos A figura a seguir mostra dois resultados possíveis, caso eles Neste módulo, estudaremos duas grandezas vetoriais: total dos dois carros, A e B, dependerá da direção

princípios de conservação, até então desconhecida. O Princípio

estejam movendo-se no mesmo sentido ou em sentidos opostos.

da Conservação da Quantidade de Movimento
mostrou-se

muito útil para o estudo de colisões e de explosões,
situações Se os carros possuem a mesma direção e o
mesmo

em que forças intensas e de curto período de duração
atuam sentido:

sobre os corpos. $Q = Q_{\text{Total}} + m_A v_A + m_B v_B \Rightarrow Q = 2,0 \times 10^4 \text{ kg.m/s}$

Quantidade de movimento (Q) $Q_A = 1,0 \times 10^4 \text{ kg.m/s}$ $Q_B = 1,0 \times 10^4 \text{ kg.m/s}$

$$v = m \cdot Q$$

m m

A B

A quantidade de movimento de uma partícula de
massa m

é definida pelo produto m.v. Se os carros possuem a
mesma direção e sentidos opostos: v , em que v é a
velocidade da

partícula. O vetor quantidade de movimento é
representado $Q = Q_{\text{Total}} + m_A v_A + m_B v_B \Rightarrow |Q| = 0$ por Q.
Logo, $Q = m \cdot v$, de modo que o vetor quantidade de

movimento tem as seguintes características: $Q_A = 1,0 \times 10^4 \text{ kg.m/s}$ $Q_B = -1,0 \times 10^4 \text{ kg.m/s}$

Módulo: $|Q| = m|v|$

Direção: A direção de Q é a mesma de v .

Sentido: O sentido de Q é o mesmo de v .

No Sistema Internacional de Unidades, a unidade de

$m \cdot A \cdot B$

quantidade de movimento é o kg. .

s De maneira geral, para um sistema de n partículas,

Quantidade de movimento de um a
quantidade de movimento total do sistema, Q , será
dada por:

sistema $Q = Q + +_1 Q_2Q + ... +_3 Q_n$

Para alterar a velocidade de uma partícula e,

As ciências da natureza, entre elas a Física, apesar
de consequentemente, alterar sua quantidade de
movimento,

reconhecerem a conexão entre vários elementos
existentes é necessária a aplicação de uma força.
Assim, ao exercermos

na natureza, muitas vezes realizam uma separação
desses uma força sobre um corpo, podemos alterar o
módulo de

elementos para melhor compreendê-los. Denominamos
sua velocidade, o que alterará, além de sua

quantidade

de sistema isolado uma parte ou uma região do Universo de movimento, o valor de sua energia cinética. Podemos

que, por suas condições particulares, pode ser considerada também alterar somente a direção ou o sentido de sua

isolada do resto do Universo, para efeitos de estudo. velocidade, de forma que sua energia cinética permaneça

Ao trabalharmos com a quantidade de movimento de um constante, como mostrado no exemplo a seguir.

Editora Bernoulli 13

Frente A Módulo 12

EXERCÍCIO RESOLVIDO Como Δt é uma grandeza escalar positiva, o vetor impulso possui as seguintes características:

01. Uma bola de massa 2 kg, que se move com velocidade Módulo:
 $|I| = |F|\Delta t$

constante de módulo igual a 3 m/s, choca-se com um Direção: A direção de I é a mesma de F.

muro e inverte o sentido de seu movimento, passando

a mover-se com velocidade constante de módulo igual a Sentido:

O sentido de I é o mesmo de F .

-3 m/s . Determinar os módulos da quantidade de A unidade do impulso no SI é o kg.m/s . Como 1 N é igual

movimento e da energia cinética da bola antes e depois a 1 kg.m/s^2 , outra unidade do impulso é o N.s .

da colisão com o muro.

Resolução: Método gráfico para se calcular

Usando as equações que expressam a quantidade de **O**
impulso

movimento e a energia cinética de um corpo, obtemos:

Velocidade Quant. de Energia A expressão $I = F.\Delta t$, assim
como a expressão usada

movimento cinética para se calcular o valor do trabalho
realizado por uma força

Antes da $+3 \text{ m/s}$ $+6 \text{ kg.m/s}$ 9 J ($W = F.\cos \theta.d$), somente pode ser utilizada se o módulo
colisão da força F for constante, o que não
acontece em muitas **Após a** -3 m/s -6 kg.m/s 9 J
ocasiões. Quando o módulo da força F for
variável, podemos colisão

calcular o módulo do impulso I por meio da área sob a

Observe que a energia cinética é uma grandeza escalar. do gráfico de força *versus* tempo. Nesse caso, o cálculo deve

Portanto, a inversão do movimento não alterou seu valor. levar em consideração o sinal da força, ou seja, áreas acima

Entretanto, a quantidade de movimento é uma grandeza do eixo do tempo têm sinal positivo, e áreas abaixo do eixo

vetorial. Dessa forma, a inversão do sentido do movimento do tempo têm sinal negativo no cálculo algébrico do impulso.

alterou o sentido do vetor quantidade de movimento Q.

$$F I = A - A_{12}$$

Impulso I de uma força constante (soma algébrica)

Forças de grande intensidade, ainda que atuem por curtos intervalos de tempo, provocam grandes variações

na quantidade de movimento dos corpos. Por exemplo,

as forças que atuam em um carro durante um teste de colisão A_1 (*crash test*), apesar de atuarem sobre o veículo durante um pequeno intervalo de tempo, provocam uma grande

variação na quantidade de movimento do carro, pois o vetor t A quantidade de movimento do veículo, que possuía módulo $_2$

não nulo, torna-se nulo em uma pequena fração de segundo.



EXERCÍCIO RESOLVIDO

02. (FGV-SP) Ao acender um isqueiro, uma pessoa faz com que seu dedo exerça uma força variável direcionada a

três
ações
distintas:

I. É preciso vencer a força de atrito estático entre o rolete e a pedra contra ele pressionada.

Considere uma força constante F atuando sobre um corpo II. Superado o atrito estático, a força aplicada não mais

durante um intervalo de tempo Δt . necessita ser de tamanho tão elevado e, portanto,

pode ser reduzida. Ainda em contato com o rolete,

F

o dedão desce e começa a abaixar a alavanca que

libera
o
gás.

$t \Delta t = t - t_{12}$ III. Uma vez livre do rolete e com a alavanca que libera

O impulso o gás completamente pressionada, a força é mantida I da força F é a grandeza física que mede o

efeito de uma força constante durante o tempo que for necessário manter F atuando sobre um corpo durante um

intervalo de tempo a chama acesa. Δt . O impulso I é definido como o produto da força F pelo intervalo de tempo Δt . O gráfico mostra, hipoteticamente, a intensidade da força



exercida por uma pessoa no ato de acender um isqueiro,

$I = F \cdot \Delta t$ para cada ação descrita.

14 Coleção Estudo

Impulso e quantidade de movimento

F (N) **1. Aumentando a quantidade de movimento**

2 Para que a quantidade de movimento de um corpo

1 aumente, a força resultante que atua sobre ele deve ser não nula e deve possuir uma componente que atue 0 sobre o corpo na mesma direção e no mesmo sentido

0,5 1,0 t (s)

Ações: I II III do vetor quantidade de movimento desse.

Um jogador

de futebol, ao cobrar uma falta, tenta exercer sobre a

Nessas condições, o impulso da força exercida pelo dedão

sobre o rolete do isqueiro e sobre a alavanca que libera bola uma força com a maior intensidade que ele puder

o gás até seu completo abaixamento tem intensidade, e durante o maior tempo possível, pois, nessa situação,

em N.s, de o aumento da quantidade de movimento (e a direção

A) 0,05. B) 0,10. C) 0,15. D) 0,20. E) 0,25. correta) podem significar um gol. As forças de grande

Resolução: curtos são chamadas de forças impulsivas. O gráfico intensidade que atuam em intervalos de tempo muito

Interpretando o enunciado, vemos que o impulso a seguir representa a intensidade de uma força

da força exercida pelo dedão deve ser calculado impulsiva e, ao mesmo tempo, o valor da força média

somente para as ações I e II, ou seja, para os trechos (F) que produziria a mesma variação da quantidade m

I e II do gráfico. Não podemos utilizar a equação

de movimento.

$I = F \cdot \Delta t$ para calcular o impulso, pois o módulo da força não é constante. Logo, devemos determinar o módulo do F impulso pelo método gráfico. $F_{\text{Máx.}}$

A área sob a curva do gráfico nos trechos I e II pode ser calculada dividindo-se a figura em 2 triângulos e 1 retângulo, ou seja:

$$I = \frac{1}{2} \cdot 0,1 \cdot 20 + 0,1 \cdot 10 + \frac{1}{2} \cdot 0,1 \cdot 20 = 0,1 + 0,1 + 0,1 = 0,3 \text{ N.s}$$

$$\Rightarrow I = 0,3 \text{ N.s}$$

Teorema do Impulso e da *Representação gráfica de uma força impulsiva.*

A área hachurada possui o mesmo valor da área sob a

Quantidade de Movimento *curva de intensidade da força impulsiva.*

massa m se relaciona com a aceleração a adquirida sobre a bola. O pé do jogador não exercerá força por esse corpo por meio da 2ª Lei de Newton: sobre a bola enquanto não houver contato entre o $F = m \cdot a$.

Portanto, sendo $a = \Delta v / \Delta t$, temos a equação $\Sigma F_R = m_R a$. A força resultante F que atua sobre um corpo de massa m_R tem a mesma intensidade da força que o pé do jogador exerce sobre ela. Suponhamos que o gráfico anterior represente a

força exercida pelo pé e a bola. Logo, durante esse intervalo de tempo, o Teorema do Impulso e da Quantidade de Movimento: a força F será nula. No instante t , o pé do jogador

entra em contato com a bola, e o módulo da força $F_R \Rightarrow F_R \Delta t = m \Delta v \Rightarrow I = m v - m v_0 \Delta t$ que o pé exerce sobre ela aumenta rapidamente até

atingir um valor máximo. A partir desse instante,



O contato do pé do jogador com a bola diminui e, $\Sigma F_R = \Delta Q$

consequentemente, o módulo da força exercida

De acordo com o resultado anterior, a variação da quantidade de movimento de um corpo em um certo intervalo de tempo é igual ao impulso da força resultante impulsiva será nula. Quando nos referirmos a forças que atua sobre ele nesse mesmo intervalo de tempo.

Como impulsivas, estaremos nos referindo aos valores mostrado anteriormente, as unidades N.s (impulso) e kg.m/s médios dessas forças. (quantidade de movimento) são equivalentes.

2. Diminuindo a quantidade de movimento num

A relação entre o impulso e a quantidade de movimento

grande intervalo de tempo

permite analisar várias situações em que a quantidade de movimento de um corpo varia. Vamos nos deter a Se você estivesse dirigindo um carro que por algum três situações: (1) a quantidade de movimento aumenta; motivo perdeu os freios, e tivesse de escolher entre

(2) a quantidade de movimento diminui em um intervalo de jogá-lo em uma parede ou em um monte de capim,

tempo longo; (3) a quantidade de movimento diminui em um temos certeza de que o seu bom senso lhe diria para

curto intervalo de tempo. Após a análise dessas três situações, jogar o carro sobre o monte de capim. Em qualquer

estudaremos outras em que a quantidade de movimento de que fosse o local escolhido, a parede ou o monte de

um corpo se conserva. capim, a variação da quantidade de movimento do

Editora Bernoulli 15

Frente A Módulo 12

carro seria, rigorosamente, a mesma, de um valor
C) Qual o módulo do impulso exercido sobre o boneco?

$Q = m.v$ até um valor $Q = 0$. Porém, na colisão
com o D) Os cintos são projetados para suportar uma força de

o monte de capim, o tempo no qual ocorre a
variação até 3 000 kgf. Sabendo que o intervalo de tempo de

da quantidade de movimento é maior e,
portanto, uma colisão desse tipo é de 0,15 s, determinar se o

o módulo da força impulsiva média é menor. cinto
irá suportar ou não esse impacto.

Resolução

A) Para se calcular o módulo da quantidade de
movimento inicial, Q_0 , e final, Q , basta utilizar a equação $Q = mv$,
com os valores da velocidade inicial

(50 km/h $\approx$ 14 m/s) e da velocidade final (0 km/h):

$$Q = mv = 80 \text{ kg} \cdot 14 \text{ m/s} = 1,1 \times 10^3 \text{ kg.m/s}$$

Lembre-se de que $I = \Delta Q$, ou seja, $Q = mv = 80 \text{ kg} \cdot 0$
 $\text{m/s} = 0 \text{ kg.m/s}$ ΔQ . Logo, $F_R \Delta t = m \Delta v$ um
tempo mais longo é “compensado” por uma força
B) A variação da quantidade de movimento do boneco

de menor intensidade. é dada por $\Delta Q = Q - Q_0$. Logo:

Esse fato é conhecido e utilizado por pessoas que $\Delta Q = Q - Q_0 = 0 \text{ kg.m/s} - 1,1 \times 10^3 \text{ kg.m/s}$ saltam, sejam paraquedistas, atletas ou bailarinos. $\Delta Q = -1,1 \times 10^3 \text{ kg.m/s}$ Para reduzir a intensidade da força que os músculos C) O módulo do impulso I exercido sobre o boneco é igual devem exercer, essas pessoas procuram aumentar ao ao módulo da variação da quantidade de movimento

máximo o intervalo de tempo no qual a sua velocidade deste, pois $I = \Delta Q$. Logo, o impulso exercido sobre o está variando, flexionando bem as pernas. boneco é igual a $1,1 \times 10^3 \text{ kg.m/s}$. É importante lembrar

que o boneco é o nosso sistema e que esse impulso é

3. exercido por um agente que não pertence ao sistema, **Diminuindo a quantidade de movimento num**

pequeno intervalo de tempo o cinto de segurança. A força peso e a força normal

também são forças externas, mas essas se cancelam.

Quando os engenheiros tentam nos convencer de Já o efeito da força de atrito, outra força externa,

que as grossas chapas de ferro, de que eram feitos é muito pequeno e pode ser desprezado.

os carros antigos, são menos seguras que as atuais D) O módulo da força que o cinto aplica sobre o boneco

chapas mais finas, eles estão plenamente conscientes pode ser calculado pela relação $I = F\Delta t$.

da física que está por trás dessa “aparente” $1,1 \times 10^3 \text{ kg m/s}$ / contradição. As chapas mais finas vão se deformar $F = 73 \times 10^3 \text{ kg m/s}^2$ 0 15 , s mais, aumentando o tempo de duração do impacto, no caso de uma colisão. Por esse motivo, elas são $\Rightarrow F = 73 \times 10^3 \text{ N}$ $F = 73 \times 10^2 \text{ kgf}$

mais seguras. Em uma colisão de menor duração, Como o cinto foi projetado para suportar 3000 kgf ,

o módulo da força impulsiva média é o maior; ele, sem dúvida, passou no teste. portanto, as consequências da ação dessa força

podem ser mais desastrosas. **04.** (UNIFESP) Uma menina deixa cair uma bolinha de massa

de modelar que se choca verticalmente com o chão e para.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

A bolinha tem massa 10 g e atinge o chão com velocidade

de
 $3,0$
 m/s

Pode-se afirmar que o impulso exercido pelo chão sobre

03. A maior fabricante de cintos de segurança no Brasil simula essa bolinha é vertical, tem sentido para

as colisões que podem ocorrer com um motorista colocando A) cima e módulo $3,0 \times 10^{-2} \text{ N.s}$.

um boneco (de massa 80 kg) em um carro de teste. B) baixo e módulo $3,0 \times 10^{-2} \text{ N.s}$.

O carro é lançado em uma barreira fixa a 50 km/h e para C) cima e módulo $6,0 \times 10^{-2} \text{ N.s}$.

em menos de 0,5 s. D) baixo e módulo $6,0 \times 10^{-2}$ N.s.

y E) cima e módulo igual a zero.



ay Safet **Resolução:** w

A força exercida pelo chão sobre a bolinha possui direção vertical e sentido para cima. Logo, o impulso dessa força também será vertical para cima.

ance Institute for High Para se calcular o módulo do impulso, basta utilizar o Insur Teorema do Impulso e da Quantidade de Movimento.

Disponível em: . Considerando positivo o sentido vertical para cima, temos:

Acesso em: 22 fev. 2011 $I = \Delta Q \Rightarrow I = mv - mv_0 \Rightarrow I = m(v - v_0)$

A) Calcular o módulo da quantidade de movimento inicial $\Rightarrow I = 1,0 \times 10^2 [0 - (-3,0)]$ e final do boneco.

B) Qual o módulo da variação da quantidade de $\Rightarrow I = 3,0 \times 10^{-2}$ N.s

movimento do boneco? Assim, a alternativa correta é a A.

Impulso e quantidade de movimento

Conservação da Quantidade de Blocos

em Blocos repouso soltos **Movimento** Força $|F_{AB}| = |F_{BA}|$

Sistema, forças internas e forças

externas **Massa** $m_A > m_B$ $m_A > m_B$

Aceleração $|a_A| = |a_B| = 0$ $|a_A| < |a_B|$

Consideremos um sistema constituído por dois ímãs.

Velocidade $|v_A| = |v_B| = 0$ $|v_A| < |v_B|$

Esses ímãs são colocados sobre uma superfície horizontal **Quantidade de** $|Q_A| = -|Q_B|$ sem atrito e atraem-se mutuamente, como mostra a figura $|Q| = |Q_{\text{movimento}}| = 0 \Rightarrow |Q_{\text{total}}| = 0$ a seguir. Uma pessoa, externa ao sistema, segura os ímãs para que eles não entrem em movimento.

Apesar de termos exemplificado um caso simples,

M o resultado anterior é válido para todas as situações em que m

F o sistema está isolado, isto é, quando o sistema não está $F_{B \text{ em } A} = F_{A \text{ em } B}$

N sujeito a forças externas. S N S

$$\vec{F}_{\text{externas}} = 0 \Rightarrow |\vec{I}_{\text{externo}}| \Rightarrow |\Delta Q| = 0 \Rightarrow Q_{\text{antes}} = Q_{\text{depois}}$$

Os ímãs A e B constituem um sistema de corpos. As forças O resultado anterior é conhecido como Princípio da

de interação entre os ímãs são forças internas ao sistema e não Conservação da Quantidade de Movimento. Esse princípio

alteram a quantidade de movimento desse sistema. nos mostra que, para que a quantidade de movimento do

sistema se conserve, é necessário que este esteja isolado.

Denominamos forças internas as forças de interação

Dizemos que um sistema está isolado de forças externas

entre os corpos do sistema. No caso apresentado, as forças

nos
seguintes
casos:

magnéticas de atração entre os ímãs são as forças internas,

uma vez que os ímãs A e B constituem o sistema em estudo. • não atuam forças externas sobre esse sistema;

Já a força peso e a força de reação normal, tanto em A • a resultante das forças externas que atuam sobre o

sistema é nula;

da interação entre os ímãs e a Terra (no caso da força peso) • a resultante das forças externas atuantes sobre

FÍSICA quanto em B, são forças externas. Essas forças são resultado

e da interação entre os ímãs e a superfície da mesa (no o sistema, apesar de não nula, possui módulo

caso da força normal). Como a Terra e a superfície da mesa desprezível, se comparado aos módulos das forças

não fazem parte do sistema, as forças peso e normal são internas que atuam no sistema. forças externas. O Princípio da Conservação da Quantidade de Movimento

de um sistema é um dos princípios fundamentais da Física,

Observa-se que, ao liberar os ímãs, eles se atraem e conjuntamente com outros princípios de conservação, como

adquirem uma velocidade inversamente proporcional à sua

o Princípio da Conservação da Energia e o Princípio

massa, isto é, o de maior massa adquire, proporcionalmente,

Conservação da Carga Elétrica.

a menor velocidade, já que a força resultante sobre ambos tem o mesmo módulo. Isso tem uma importante

consequência: a quantidade de movimento de cada ímã se **EXERCÍCIO RESOLVIDO** altera devido à ação da força magnética, porém a quantidade de movimento total do sistema não varia. **05.** (UFMG) A figura mostra um ventilador que está dentro

Forças internas podem alterar a quantidade de de um barco a vela.

movimento individual de cada partícula, porém a quantidade de movimento total do sistema permanece constante.

M Blocos em repouso m

N S N S

Ímã A Ímã B

M Blocos soltos m

V V· Suponha que o ventilador é ligado e que o vento

N S N S provocado por ele atinge apenas a área da vela.

Responder se, dessa forma, é possível o barco

Ímã A Ímã B movimentar-se. Justificar sua resposta.

Editora Bernoulli 17

Frente A Módulo 12

Resolução: imediatamente depois da colisão, o módulo da quantidade

Somente as forças externas a um sistema podem de movimento total do sistema é o mesmo. Entretanto, após

provocar variação na sua quantidade de movimento. a colisão, o efeitos das forças externas podem passar a ser

Na situação deste exercício, o sistema de estudo é significativos, o que provocará uma variação na quantidade

constituído pelo barco e pelo ventilador. A ação do de movimento do sistema.

ventilador sobre a vela do barco é

feita através do ar Coeficiente de restituição (sem o qual o ventilador nada faria); porém, o ar não

faz parte do sistema. O ventilador exerce força sobre

o ar e este exerce força sobre a vela. Surgem, então, A perda de energia cinética em uma colisão entre dois corpos

as forças de reação da vela sobre o ar e do ar sobre está associada à diminuição da velocidade relativa entre os

o ventilador. A força exercida sobre a vela e a força mesmos. Assim, podemos usar a razão entre os módulos da

exercida sobre o ventilador, ambas forças externas velocidade relativa de afastamento após o choque ($v_{relat.afast.}$)

exercidas pelo ar, possuem módulos iguais e de sentidos e da velocidade relativa de aproximação antes do choque

opostos. Logo, a resultante dessas forças é nula, e não ($v_{relat. aprox}$) como uma medida da perda de energia cinética

há aceleração atuando sobre o conjunto ventilador-barco. do sistema. Essa razão é conhecida como coeficiente de

O sistema, portanto, se mantém em repouso. restituição (e).

Colisões, choques e explosões $v_{e = relat}$

afast .. $V_{relat aprox}$.

Colisões, choques e explosões são situações nas quais

as forças internas são muito grandes e atuam em curtos intervalos de tempo, ou seja, são situações em que a velocidade relativa de

afastamento após o choque é igual ao módulo da velocidade

aplicação do Princípio da Conservação da Quantidade de movimento antes do choque. Portanto,

Movimento de um sistema mostra-se muito útil. o coeficiente de restituição é igual a um ($e = 1$).

Nas colisões ideais, não há dissipação de energia mecânica e, Nas colisões inelásticas, o módulo da velocidade relativa

nesse caso, temos uma colisão perfeitamente elástica, de afastamento após o choque é menor que o módulo da

na qual a energia cinética total do sistema se conserva. velocidade relativa de aproximação antes do choque. Portanto,

Nas situações reais, parte da energia mecânica é convertida o coeficiente de restituição é menor que um ($e < 1$).

em outras formas de energia, como som, calor e trabalho,

O menor valor do coeficiente de restituição é zero ($e = 0$)

este realizado pelas forças de deformação.

Denominamos e ocorre quando a velocidade relativa

de afastamento após

colisão inelástica ou parcialmente elástica aquela em que o choque é nula, ou seja, quando os corpos, após o choque,

a energia mecânica dos corpos que se chocam não se permanecem juntos (colisão completamente inelástica).

conserva. Existem colisões em que os corpos movem-se

juntos após o choque e, nesse caso, a dissipação de energia

EXERCÍCIO RESOLVIDO

mecânica é a maior possível. Chamamos esse tipo de colisão

de colisão completamente inelástica.

06. (UNESP) O pêndulo balístico é um sistema utilizado para medir a velocidade de um projétil que se move



rapidamente. O projétil de massa m_1 é disparado em direção a um bloco de madeira de massa m_2 , inicialmente em repouso, suspenso

por dois fios, como ilustrado na



figura. Após o impacto, o projétil se acopla ao bloco e ambos sobem a uma altura h .

Colisões como as que ocorrem em mesas de sinuca se aproximam $m_1 + m_2$ muito de uma colisão perfeitamente elástica. $m_1 h m$

Apesar de o valor da energia mecânica sofrer uma 2

redução na maior parte das colisões observadas, o módulo A) Considerando que haja conservação da energia

da quantidade de movimento dos sistemas isolados sempre mecânica, determinar o módulo da velocidade do

permanece constante. As forças internas ao sistema possuem conjunto bloco-projétil após o impacto. módulo muitas vezes superior ao das outras forças atuantes e, B) A partir do Princípio da Conservação da Quantidade de

por isso, podemos afirmar que, imediatamente antes e Movimento, determinar a velocidade inicial do projétil.

18 Coleção Estudo

Impulso e quantidade de movimento

Resolução: 04. (UNIFESP) Uma esfera de massa 20 g atinge uma parede

rígida com velocidade de 4,0 m/s e volta na mesma

A) Durante a subida, após o impacto, o valor da energia

direção com velocidade de 3,0 m/s. O impulso da força

mecânica se conserva, ou seja, a energia cinética do exercida pela parede sobre a esfera, em N.s, é, em

sistema bloco-projétil se transforma integralmente módulo, de em energia potencial gravitacional. Logo: A) 0,020. C) 0,10. E) 0,70.

E B) 0,040. D) 0,14. c (após a colisão) = E_p (ponto mais alto)

($2m + mv$) **05.** (UFG) A figura a seguir ilustra uma situação de colisão

$\Rightarrow \frac{1}{2}(m + m)v^2 = (m + m)gh$ 2 em que as forças dissipativas podem ser desprezadas.

$$\Rightarrow v^2 = 2gh$$

B) Imediatamente antes da colisão e imediatamente após

a colisão, o módulo da quantidade de movimento do

sistema bloco-projétil é o mesmo, uma vez que o

sistema está isolado. Logo: O bloco A, de massa M_A , desliza sobre a plataforma

$Q_{\text{total antes}} = Q_{\text{total depois}}$ frontal, perfeitamente elástica, com o bloco B, horizontal com velocidade v e realiza uma colisão

⇒ de massa M_B , inicialmente em repouso. Pode-se afirmar que, após a colisão, projétil 1 2 conjunto $m v = (m + m) v_1$

⇒ (A) se $M_A > M_B$, somente o bloco B cairá. $m + m) v$
 projétil = 1 2 V conjunto B) se $M = M$, os dois blocos cairão. m_A
 B 1 C) se $M = M$, o bloco B cairá e o bloco A ficará parado.
 A B

⇒ $(m + m) v = 1 2 D)$ os dois blocos cairão,
 independentemente dos valores $\sqrt{\text{projétil } 2gh}$ de M_A e M_B .
 1

EXERCÍCIOS PROPOSTOS FÍSICA

EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO

01. 01. (UFSC–2007) Na situação apresentada na figura a seguir, (Fatec-SP–2006) Uma esfera se move sobre uma

superfície horizontal sem atrito. Num dado instante, desconsidere o efeito do atrito.

sua energia cinética vale 20 J e sua quantidade de Estando todas as partes em repouso no início, uma pessoa

movimento tem módulo 20 N.s. puxa com sua mão uma corda que está amarrada ao outro

Nestas condições, é **CORRETO** afirmar que sua barco. Considere que o barco vazio (B) tenha a metade da

massa do barco mais a pessoa que formam o conjunto (A).

A) velocidade vale 1,0 m/s. D) massa é de 1,0 kg.

B) velocidade vale 5,0 m/s. E) massa é de 10 kg.

C) velocidade vale 10 m/s. A B

02. (UFJF-MG) A velocidade de uma bola de tênis, de massa

50 g, num saque muito rápido, pode chegar a 216 km/h,

mantendo-se aproximadamente constante durante todo

o tempo de voo da bola. Supondo que a bola esteja

inicialmente em repouso, e que o tempo de contato entre a bola e a raquete seja de 0,001 s e sendo $g = 10 \text{ m/s}^2$, assinale a(s) proposição(ões) **CORRETA(S)**.

a) a raquete e a bola se movem com a mesma velocidade. 01. Após a pessoa puxar a corda, ambos os corpos se

movem com a mesma velocidade. pode-se afirmar que a força média aplicada à bola no movimento com a mesma velocidade.

o saque é equivalente ao peso de uma massa de

02. Após o puxar da corda, o módulo da velocidade de B

A) 150 kg. B) 300 kg. C) 50 kg. D) 10 kg. será o dobro do módulo da velocidade de A.

03. 04. É impossível fazer qualquer afirmação sobre as (Mackenzie-SP) Um caminhão a 90 km/h colide com a

traseira de um automóvel que viaja com movimento retilíneo uniforme. As velocidades das partes do sistema ao se iniciar o

movimento são de mesmo sentido e velocidade de 54 km/h. A massa do caminhão é

três vezes a massa do automóvel. 08. Após o puxar da corda, as quantidades de movimento

dos dois veículos são iguais. Imediatamente após a colisão, os dois veículos caminham dos barcos apresentarão dependência entre si.

Os dois veículos se movem juntos, com velocidade de 16. Ao se iniciar o movimento, a energia cinética de A é

A) 66 km/h. C) 72 km/h. E) 81 km/h. sempre igual à energia cinética de B.

B) 68 km/h. D) 78 km/h. Soma ()

Frente A Módulo 12

02. (UFPR) Com base nos conceitos e nas leis da conservação **05.** (UFPI) Na figura a seguir, o peixe maior, de massa

da quantidade de movimento (momento linear) e da $M = 5,0 \text{ kg}$, nada para a direita a uma velocidade

energia cinética, assinale **VERDADEIRO** ou **FALSO**. $v = 1 \text{ m/s}$, e o peixe menor, de massa $m = 1,0 \text{ kg}$,

se aproxima dele a uma velocidade $u = 8,0 \text{ m/s}$, para

() A quantidade de movimento (momento linear) de uma

a
esquerda

partícula depende do sistema de referência.

() A energia cinética de uma partícula pode assumir



valores negativos. $v = 1,0 \text{ m/s}$ $u = 8,0 \text{ m/s}$



- ☐ Em uma colisão perfeitamente elástica, a energia cinética é conservada.
- ☐ Em uma colisão inelástica, a quantidade de movimento (momento linear) não é conservada. $m = 1,0 \text{ kg}$
- ☐ Quando duas partículas colidem, a velocidade do $M = 5,0 \text{ kg}$

centro de massa do sistema, na ausência de forças



externas, permanece constante. Despreze qualquer efeito de resistência da água.



Após engolir o peixe menor, o peixe maior terá uma



03. (UFSC–2006) Durante as festividades comemorativas da A) 0,50 m/s, para a esquerda. velocidade de

Queda da Bastilha, na França, realizadas em 14 de julho B) 1,0 m/s, para a esquerda.



de 2005, foram lançados fogos de artifício em homenagem



C)
nula.



ao Brasil. Durante os fogos, suponha que um rojão com



D) 0,50 m/s, para a direita.

defeito, lançado obliquamente, tenha explodido no ponto

E) 1,0 m/s, para a direita.

mais alto de sua trajetória, partindo-se em apenas dois

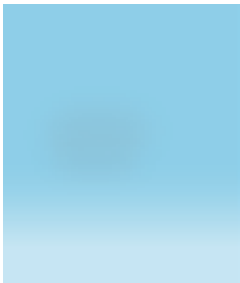
pedaços que, imediatamente após a explosão, possuíam **06.** (PUC-SP) O gráfico representa a força resultante sobre

quantidades de movimento p_1 e p_2 . um carrinho de supermercado de massa total 40 kg,

Considerando-se que todos os movimentos ocorrem em inicialmente em repouso.

um mesmo plano vertical, assinale a(s) proposição(ões)

que apresenta(m) o(s) par(es) de vetores p_1 e p_2 30 F (N)



fisicamente **POSSÍVEL(EIS)**.



01. 08. p_2 p_1 p_2



$p_1 = 0$ t (s)



10 20 25



02. 16. p_1 p_2 A intensidade da força constante que produz o mesmo

p impulso que a força representada no gráfico durante o t_1

intervalo de tempo de 0 a 25 s é, em newtons, igual a

04. A) 1,2. C) 15. E) 21. p_1 B) 12. D) 20. p

2

p_2

07. (UFRGS) Um par de carrinhos idênticos, cada um com

Soma () massa igual a 0,2 kg, move-se sem atrito, da esquerda

para a direita, sobre um trilho de ar reto, longo e

horizontal. Os carrinhos, que estão desacoplados um do

04. (ITA-SP-2005) Um automóvel para quase que outro, têm a mesma velocidade de 0,8 m/s em relação

instantaneamente ao bater frontalmente numa árvore. ao trilho. Em dado instante, o carrinho traseiro colide

A proteção oferecida pelo *airbag*, comparativamente com um obstáculo que foi interposto entre os dois.

ao carro que dele não dispõe, advém do fato de que a Em consequência dessa colisão, o carrinho traseiro

transferência para o carro de parte do *momentum* do passa a se mover da direita para a esquerda, mas ainda

com velocidade de módulo igual a 0,8 m/s, enquanto o

motorista se dá em condição de

movimento do carrinho dianteiro prossegue inalterado.

A) menor força, em maior período de tempo. Em relação ao trilho, os valores, em kg.m/s, da quantidade

B) menor velocidade, com mesma aceleração. de movimento linear do par de carrinhos antes e depois

da colisão são, respectivamente,

C) menor energia, numa distância menor. A) 0,16 e zero. D) 0,32 e zero.

D) menor velocidade e maior desaceleração. B) 0,16 e 0,16. E) 0,32 e 0,48.

E) mesmo tempo, com força menor. C) 0,16 e 0,32.

20 Coleção Estudo

Impulso e quantidade de movimento

08. (UNESP) Em um teste de colisão, um automóvel de **12.** (EFOA-MG) Dois blocos de massas iguais e encostados um

1 500 kg colide frontalmente com uma parede de tijolos. no outro se deslocam sobre uma superfície horizontal sem

A velocidade do automóvel anterior ao impacto era de atrito, com velocidade constante, conforme figura a seguir:

15 m/s. Imediatamente após o impacto, o veículo é jogado no sentido contrário ao do movimento inicial com

Bloco 1 Bloco 2

velocidade de 3 m/s. Se a colisão teve duração de 0,15 s, a força média exercida sobre o automóvel durante a colisão foi de

Entre os dois blocos, existe um explosivo de massa

A) $0,5 \times 10^4$ N. D) 15×10^4 N. desprezível que é detonado, fazendo com que os

B) 1×10^4 N. E) 18×10^4 N. blocos passem a se distanciar um em relação ao outro.

C) 3×10 Em relação a esse fato, é **CORRETO** afirmar que 4 N.

09. (UFG–2007) Um corpo é lançado do chão com então a energia cinética total dos dois blocos é nula. A) como um bloco está se afastando em relação ao outro,

velocidade v e ângulo de inclinação de 60° com a

B) a energia cinética dos dois blocos, antes e depois da horizontal. Quando atinge a altura máxima, colide

explosão, é a mesma.

inelasticamente com outro corpo de mesma massa e

velocidade v , que estava em queda livre. Considerando C) a quantidade de movimento total dos dois blocos,

desprezíveis as forças externas durante a colisão, antes e depois da explosão, é a mesma.

o módulo da velocidade imediatamente após o choque é D) como um bloco está se afastando em relação ao

A) $\left(\frac{1}{2}\right)$ dois blocos é nula. 5 D) $\left(\frac{1}{2}\right)$ v. $\left(\frac{1}{2}\right)$ $\left(\frac{1}{2}\right)$ 4 $\left(\frac{1}{2}\right)$ 3 outro, então a quantidade de movimento total dos 4 $\left(\frac{1}{2}\right)$ E) tanto a energia cinética total como a quantidade de

$\left(\frac{1}{2}\right)$ 3 movimento total dos dois blocos diminuem após a

B) $\left(\frac{1}{2}\right)$ explosão. v. E) $\left(\frac{3}{8}\right)v$.

$\left(\frac{1}{2}\right)$ 8 $\left(\frac{1}{2}\right)$

13. (UEFS-BA) Deixa-se cair, de uma altura de 8 m, sobre

C) $\left(\frac{3}{4}\right)v$. uma superfície plana horizontal, uma bola que rebate e

atinge uma altura de 2 m. Com base nessa informação,

10. (UFAM) O corpo B da figura tem massa m pode-se afirmar que o coeficiente de restituição entre a B = 20 kg e pode **FÍSICA**

mover-se sem atrito sobre uma superfície horizontal. bola e a superfície é igual a

Do topo deste, como ilustra a figura, abandona-se um A) 0,1. C) 0,3. E) 0,5.

corpo A de massa $m = 10$ kg que, após deslizar sem A B) 0,2. D) 0,4.

atrito sobre a superfície ondulada do corpo B, dela se

separa, com uma velocidade horizontal $v = 4,0$ m/s,

14. (FUVEST-SP) Num espetáculo de fogos de artifício, um

a uma altura h abaixo da posição inicial. rojão, de massa $M = 0,5$ kg, após seu lançamento, descreve o

no céu a trajetória indicada na figura. No ponto mais alto
g de sua trajetória (ponto P), o rojão explode, dividindo-se

A v em dois fragmentos, A e B, de massas iguais a $M_0/2$. Logo após a
explosão, a velocidade horizontal de A, v_A ,
B é nula, bem como sua velocidade vertical.

Com base nas leis da Conservação da Energia Mecânica e da Quantidade de Movimento, podemos afirmar que o
valor da velocidade final do corpo B e a altura h valem, P 50

40 g

respectivamente,

30

A) 2,0 m/s e 1,0 m. D) 2,0 m/s e 1,2 m.

20

B) 2,0 m/s e 0,8 m. E) 4,0 m/s e 0,8 m. 10 x (m) C) 4,0 m/s e 1,2
m. 10 20 30 40 50 60 70 80

11. (UERJ–2007) Um estudante, ao observar o movimento de **Note e**
adote: A massa do explosivo pode ser considerada

uma partícula, inicialmente em repouso, constatou que a
desprezível.

força resultante que atuou sobre a partícula era não nula A)
DETERMINE o intervalo de tempo T_0 , em segundos, e manteve
módulo, direção e sentido inalterados durante transcorrido entre o

lançamento do rojão e a explosão

todo o intervalo de tempo da observação. Desse modo, no ponto P.

ele pôde classificar as variações temporais da quantidade de B)
DETERMINE a velocidade horizontal v_0 , do fragmento B, movimento
e da energia cinética dessa partícula, ao longo logo após a explosão,
em m/s. do tempo de observação, respectivamente, como C)
Considerando apenas o que ocorre no momento da

A) linear; linear. C) linear; quadrática. explosão, **DETERMINE** a
energia E_0 fornecida pelo

B) constante; linear. D) constante; quadrática. explosivo aos dois
fragmentos A e B, em joules.

Editora Bernoulli 21

Frente A Módulo 12

15. (U F P E – 2 0 0 6) D o i s b l o c o s A e B, d e m a s s a s Essa
aparente violação do Princípio da Conservação da

m Quantidade de Momento Linear de um sistema pode ser $A = 0,2$
kg e $m_B = 0,8$ kg, respectivamente, estão

presos por um fio, com uma mola ideal comprimida entre explicada
eles. Os blocos estão inicialmente em repouso, sobre A) pela
expansão dos gases que também entram em

uma superfície horizontal e lisa. Em um dado instante, movimento
para frente junto com a bala.

o fio se rompe liberando os blocos com velocidades B) pela força da
gravidade que atua na bala, na direção

v e v , respectivamente. **CALCULE** a razão v/v entre perpendicular
ao movimento desta. $A B A B$

os módulos das velocidades. C) pela maior massa do revólver que reduz a velocidade

da bala e, conseqüentemente, seu momento linear.

Mola D) pelo efeito da força de resistência do ar sobre a bala quando esta entra em movimento.

A B E) pelas forças externas que atuam na bala e que alteram, com o passar do tempo, seu momento linear.

Fio

03. Em 13 de janeiro de 1920, o jornal *The New York Times*

16. publicou um editorial atacando Robert Goddard – um físico

(UFU-MG–2006) Considere o gráfico adiante, que

que propunha utilizar foguetes para viagens espaciais.

representa a grandeza A em função do tempo t (em unidades de 10 s).

–3 Dizia o editorial:

O que o Prof. Goddard, com sua “cadeira” no Clark

A College, e seus colaboradores do Instituto Smithsonian

não conhecem é a relação entre ação e reação e a

12 necessidade de ter algo melhor que o vácuo contra o qual

reagir – o que dizem é um absurdo. Naturalmente, ele

só parece não ter o conhecimento diariamente ensinado

nas escolas de Ensino Médio.

0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 t (10⁻³ s)

O erro científico do editorial foi

A) Se a grandeza A representar a amplitude de uma onda A) definir de forma equivocada o vácuo que, na Física

sonora, **DETERMINE** sua frequência. Moderna, não significa ausência de matéria.

B) Se a grandeza A representar o módulo da quantidade B) desconsiderar que componentes do foguete são

de movimento (em kg.m/s) de um corpo de massa empurradas para trás durante o lançamento. $m = 3 \text{ kg}$, **DETERMINE** a variação da energia C) esquecer que um foguete tem que empurrar algo

cinética desse corpo entre os instantes $t = 0 \text{ s}$ e material para que consiga se mover. $t = 6 \times 10^{-3} \text{ s}$. D) impedir que ideias não testadas pudessem ser

SEÇÃO ENEM colocadas à prova experimental para então serem

debatido

E) não conhecer as exceções de aplicação das Leis de

01. Newton para os movimentos, em particular a 3ª Lei. Suponha que existam três astronautas do lado de fora

de uma nave espacial e que eles decidam brincar de

se arremessarem. Todos eles possuem o mesmo peso **GABARITO** na Terra e todos são igualmente fortes. O primeiro

astronauta arremessa o segundo

para o terceiro e a Fixação brincadeira tem
início. Quantas arremessadas a mais

ainda será possível realizar? 01. E 02. B 03. E 04. D 05. C

Propos

01.
Soma
=
10

02.
V
F
V
F
V

03.
Soma
=
09

04. A 06. E 08. E 10. D 12. C

A) 1 B) 2 C) 3 D) 4 E) 5 05. A 07. D 09. A 11. C 13. E

14.
A)
3,0
s

02. B) 40 m/s Quando uma arma de fogo é disparada, ao contrário
do

que se deve esperar, o valor do momento da bala é menor C) 100 J

que o valor do momento da arma que recua. 15. $v_A/v_B = 4$

16.
A)

f
=
125
Hz

B)
 Δ
 E_c
=
—
24
J

Seção Enem

01. A 02. A 03. B

22 Coleção Estudo

FÍSICA MÓDULO FRENTE Teoremas de Torricelli e 11 B Stevin

Finalizada a Mecânica dos Sólidos, vamos, neste e no
A tabela a seguir apresenta o valor da densidade de
próximo módulo, abordar a Hidrostática, área da
Física algumas substâncias. Para os gases, que são
substâncias
reservada ao estudo do equilíbrio nos líquidos.

Diversos compressíveis, a densidade depende, além da temperatura,

aparelhos e situações do nosso dia a dia são explicados também da pressão. Os sólidos e os líquidos são praticamente

com base nos princípios da Hidrostática, como o sistema incompressíveis, e, por isso, suas densidades dependem

de distribuição de água em uma cidade, o freio hidráulico essencialmente da temperatura. No Sistema Internacional

de um carro, a flutuação de uma embarcação no mar, etc. de Unidades (SI), a unidade de densidade é o kg/m^3 . Para

importantes para o estudo da Hidrostática: densidade ₃ basta multiplicar os valores por 10. Assim, por exemplo, e pressão. Em seguida, vamos explicar o que é pressão a densidade da água, no SI, é $1,0 \times 10$ Iniciaremos o módulo apresentando dois conceitos converter os valores de densidade dessa tabela para o SI,

_{3 3} kg/m^3 .

atmosférica e como Torricelli mediu, originalmente, o seu

valor. Por último, vamos estudar a equação fundamental ₃ Estado Substância Densidade (g/cm^3) da

DENSIDADE Sólidos à Alumínio 2,7 temperatura

ambiente Osso 1,7 a 2,0

Você já deve ter notado que as pessoas se referem ao
Carvalho 0,60 a 0,90

chumbo como exemplo de algo pesado. Entretanto,
tratando Gasolina 0,70

mais pesado do que, por exemplo, a madeira. Pense
em um temperatura a situação com rigor físico, é
impreciso dizer que o chumbo é Líquidos à Etanol 0,80
pequeno pedaço de chumbo que você sustenta na
palma da ambiente Água 1,0 mão. Certamente, ele é muito
mais leve do que uma grande

Mercúrio 13,6

tora de madeira sobre o solo, a qual você mal
consegue mover.

O chumbo, na verdade, é mais denso do que a
madeira. Ar 0,0012 Gases a Isso significa que a quantidade
de massa presente em certo 1 atm e 25 °C Hélio 0,00016
volume de chumbo é maior do que a quantidade de
massa

presente em um mesmo volume de madeira.

Podemos calcular a densidade de um corpo por meio

A densidade, também denominada massa específica, é uma razão mostrada a seguir, em que m e V são a massa

propriedade física intensiva da matéria que indica o quanto

e o volume do corpo, respectivamente. A massa pode a massa de uma substância se acha compactada em dado

ser medida facilmente em uma balança. O volume volume. Por exemplo, à temperatura ambiente, a densidade

do chumbo é $11,3 \text{ g/cm}^3$ pode ser calculado utilizando uma expressão específica, e a do carvalho (um tipo de madeira)

é cerca de $0,70 \text{ g/cm}^3$ quando o corpo possuir uma geometria padrão, como a esfera. Esses valores indicam que um volume

de 1 cm^3 de um cubo ou a de uma esfera. Para geometrias não esféricas, de chumbo tem massa de $11,3 \text{ g}$, enquanto 1 cm^3

da madeira tem massa de apenas $0,70 \text{ g}$. convencionais, como a de uma pedra, o volume pode ser

determinado mergulhando o corpo em um recipiente com

A densidade dos materiais depende da temperatura,

água e coletando / medindo o volume de água deslocado,

pois o volume de certa quantidade de matéria varia

com a temperatura. Com raras exceções (a água, entre que será numericamente igual ao volume do corpo.

0 °C e 4 °C, é uma delas), a matéria se dilata quando Na figura 1, que ilustra essa técnica, você saberia calcular a

a temperatura aumenta. Por isso, para a maioria dos densidade da pedra, sabendo que a sua massa vale 800 g?

corpos, quando a temperatura aumenta, a massa, que



é constante, fica distribuída em um volume maior, de forma que a matéria torna-se menos compactada, isto é, $\rho = \frac{m}{V}$ menos densa. V

Editora Bernoulli 23

Frente B Módulo 11

Para calcular a pressão que uma força exerce sobre

uma superfície, usamos o quociente a seguir, em que F é a intensidade da força e A é a área sobre a qual a força está atuando. De acordo com essa equação, a unidade de pressão, no SI, é N/m^2 , também denominada Pascal (Pa), em homenagem ao francês Blaise Pascal, por suas contribuições em Mecânica dos Fluidos. Neste módulo, além do Pascal, usaremos duas outras unidades de pressão: a atmosfera (atm) e o milímetro de coluna de mercúrio (mmHg).



$$0,20 \text{ L F } \rho =$$



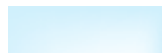
A



Figura 1: Técnica experimental para se medir o volume de



A discussão anterior de que uma mesma força, dependendo



um corpo.

da área sobre a qual atua, pode exercer diferentes pressões

está de acordo com essa equação, a qual mostra que, para

PRESSÃO uma mesma força, quanto maior a área, menor a pressão,

e vice-versa. Uma experiência simples para confirmar esse

fato está representada na figura 3, que mostra as pontas e

Algumas pessoas confundem força com pressão. Para as cabeças de dois pregos pressionando dois cadernos (de

entender a diferença que há entre essas grandezas, considere grande espessura para evitar acidentes). Usando a condição



a figura 2. Nela, há dois tijolos iguais, um em pé, apoiado de equilíbrio translacional e a lei de ação e reação, podemos

sobre a face menor, e o outro deitado sobre a face maior. mostrar que as intensidades das forças que os pregos



exercem sobre os cadernos são iguais nos quatro pontos de



É claro que as forças de compressão que os dois tijolos

contato. Contudo, tendo áreas muito pequenas, as pontas



exercem sobre a mesa são iguais, pois eles apresentam o

exercem pressões sobre os cadernos muito maiores do

mesmo peso. Porém, o tijolo que está de pé exerce maior

que as pressões exercidas pelas cabeças dos pregos.
Isso



pressão sobre a mesa, pois a força de compressão exercida por pode ser constatado observando que as pontas dos pregos



esse tijolo está distribuída sobre uma área menor. Cada cm^2 perfuram os cadernos, mas que as cabeças não perfuram.



de área debaixo desse tijolo sofre ação de uma força de



maior intensidade do que a força que age sobre cada cm^2 de área que está sob o outro tijolo. Quanto menor a área

■
de apoio, maior é a pressão que certa força exerce sobre

■
essa área. Se um dos tijolos for inclinado, de forma a ficar

■
apoiado sobre uma das arestas, a área de apoio será muito

■
pequena, a pressão será muito grande e talvez a quina do

■
tijolo se quebre em algum ponto, caso o material do tijolo *Figura 3: Experiência para mostrar que forças iguais podem*

■
não seja de boa qualidade. Isso revela que, da mesma forma *exercer pressões diferentes.*

■
que o tijolo exerce uma pressão sobre a mesa, esta também A dependência entre a pressão e a área é verificada em

■
exerce uma pressão sobre o tijolo. Isso nada mais é do que várias situações do nosso dia a dia. Às vezes, desejamos

■
uma decorrência da lei de ação e reação. exercer uma
pressão pequena e, para conseguir isso, usamos

■
uma área grande. Um exemplo desse caso ocorre
quando

■
nos sentamos em uma cadeira anatômica. O grande
conforto

■
que sentimos decorre do fato de exercermos uma
pequena

■
pressão sobre o assento, uma vez que a força de
compressão

■
do nosso corpo sobre a cadeira é distribuída sobre
uma

■
área muito maior do que a área do assento das
cadeiras

■
comuns. Outras vezes, queremos exercer uma pressão



grande e, para isso, usamos uma área pequena. Esse é o



caso, por exemplo, de um bisturi cirúrgico. A área de apoio do instrumento é tão pequena que uma mínima força exercida sobre o bisturi produz uma pressão grande o suficiente para cortar a pele do paciente. Preste atenção em outros objetos e fatos do seu dia a dia. Certamente você perceberá muitas

Figura 2: Tijolos iguais exercem pressões diferentes sobre uma situação em que a pressão desejada (grande ou pequena)

superfície, dependendo da base de apoio sobre a qual estão é obtida por meio da utilização de uma área adequada para apoiados. a superfície de apoio da força.

Teoremas de Torricelli e Stevin

Em 1664, o italiano Evangelista Torricelli mediu a

pressão atmosférica ao nível do mar por meio de uma

PARA REFLETIR experiência extraordinariamente simples. Torricelli encheu

Para um carro atravessar um terreno um longo tubo de ensaio com mercúrio. Em seguida, com



arenoso e fofo, por que é conveniente esvaziar o dedo, ele fechou a boca do tubo, colocou-o de cabeça



um pouco os pneus? para baixo e mergulhou-o em uma bacia também com



mercúrio. Retirando o dedo, ele observou que a coluna de

PRESSÃO ATMOSFÉRICA

mercúrio desceu um pouco, estabilizando-se a uma altura

de 760 mm, conforme mostra a figura 5. Como no espaço

vazio criado pela descida do mercúrio no tubo havia vácuo,

Como você sabe, o ar atmosférico é constituído por Torricelli concluiu que a pressão exercida pela coluna de

partículas que se movem caoticamente em todas as direções. 760 mm de mercúrio foi equilibrada pela

pressão atmosférica

Por isso, as paredes, o solo, as pessoas e todos os outros exercida pelo ar sobre a superfície livre do mercúrio na

corpos imersos na atmosfera terrestre ficam sujeitos às bacia. Repetindo a experiência acima do nível do mar, forças de impacto dessas partículas. A pressão atmosférica é,

Torricelli verificou que a coluna equilibrada era
menor do que

portanto, a soma das pressões que as partículas
constituíntes

760 mm, revelando que a pressão atmosférica é
máxima

do ar exercem sobre um objeto que se acha imerso na

ao nível do mar, e que ela diminui com a altitude. O
mais

atmosfera.

simples dos barômetros, aparelho usado para medir a

O ar atmosférico está mais comprimido ao nível do
mar pressão atmosférica, é baseado na montagem da
figura 5.

do que em altitudes mais elevadas. Esse fato pode ser
visualizado por meio de uma analogia com um
catálogo

telefônico, deitado sobre uma mesa, que apresenta as Vácuo folhas de baixo mais compactadas do que as folhas de cima.

Ao nível do mar, a pressão atmosférica vale:

$$P = 1,013 \times 10^5 \text{ Pa} = 1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg}_0$$

Com boa aproximação, para cada aumento de 5,5 km

na altitude, a pressão atmosférica é reduzida à metade. Esse **FÍSICA**

tipo de comportamento caracteriza uma redução exponencial

de uma grandeza. A figura 4 mostra a variação da pressão

atmosférica com a altitude. Observe que, para altitudes de 10 km,

típica de aviões de grande porte, a pressão atmosférica é,

aproximadamente, 0,4 atm, e por isso o interior desses aviões deve ser pressurizado. 760 mm

0,001 atm Cerca de 99,9% reduzida 50 Mercúrio

40 atmosférica

0,005 atm

Cerca de 99% reduzida

0,01 atm

30

0,025 atm

0,050 atm *Figura 5: Experimento de Torricelli para medir a pressão*
Altitude (km) 20 atmosférica.

Cerca de 90% reduzida

10

Everest 5,5 Cerca de 50% reduzida

PARA REFLETIR



Para medir a pressão atmosférica, por



que Torricelli optou por usar o mercúrio,



0 0,1 0,3 0,5 0,7 0,9 1



e não a água, que é um líquido muito mais
Pressão atmosférica (atm)

acessível?

Figura 4: Variação da pressão atmosférica com a altitude.

PRESSÃO DE UM LÍQUIDO

Os líquidos diferem dos sólidos por não serem resistentes

aos esforços de cisalhamento, isto é, aos esforços cortantes.

Por isso, ao ser derramado em um vaso, um líquido se deforma e se adapta à forma do recipiente, qualquer que ela

seja. Mais do que isso, um líquido exerce pressão não apenas P_s sobre o fundo do recipiente, mas também sobre as suas

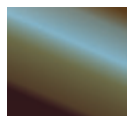


paredes. As forças de compressão que geram tais pressões

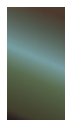
são sempre perpendiculares ao fundo e às paredes do h



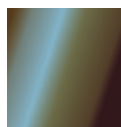
recipiente, independentemente de as paredes serem verticais



ou inclinadas. Isso pode ser facilmente verificado colocando-se



água em uma lata amassada e com alguns furos, como P_1 mostra a figura 6. Observe que a água sai através de todos



os furos, formando ângulos retos com as paredes.



Figura 7: A pressão exercida por um líquido atua em todos os sentidos.

A expressão que fornece o valor da pressão P em um ponto no

interior de um líquido de densidade ρ , a uma profundidade h , é:



$$P - P_0 = \rho gh \Rightarrow P = P_0 + \rho gh$$

Vamos deduzir essa equação. Na figura 7, observe o

volume de líquido delimitado pelo cilindro de altura h ,
 representado por um traço pontilhado. De acordo com a
 discussão apresentada, a pressão do líquido comprime esse
 cilindro em todas as direções. Lateralmente, as pressões
 no lado esquerdo e no lado direito se cancelam. Porém,
 o mesmo não ocorre com a pressão P na face superior
 e_s com a pressão P na face inferior. Como a
 profundidade e_i maior na face de baixo, temos $P > P$.
 Lembrando que a_{is}

Figura 6: A pressão da água age perpendicularmente às paredes força exercida pela água sobre as faces do cilindro pode

do recipiente. ser calculada por meio do produto entre cada uma das

Observe, na figura 6, que os dois jatos que partem dos pressões P e P e a área A das faces, concluímos que a_{is}

dois furos superiores se encurvam prontamente para baixo, força exercida pela água sobre a face inferior é maior do

que a força exercida pela água sobre a face superior. Como

enquanto o jato que sai do furo inferior tem uma

curvatura

o cilindro está em equilíbrio, a diferença entre essas forças

bem menos acentuada. Essas curvaturas diferenciadas

deve ser igual ao peso do líquido contido no cilindro.

Logo:

sugerem que a velocidade de lançamento do jato aumente

com a profundidade dentro da água, o que pode ser P
.A - P .A = m.g = .V.g, ρ justificado pelo fato de que a pressão da água aumenta com a profundidade. Isso parece bastante lógico, uma vez que, O segundo lado dessa equação expressa o peso do líquido

quanto maior for a profundidade de certo ponto dentro do cilindro, dado pelo produto entre a massa do líquido

água, maior será a quantidade de água sobre esse ponto e a aceleração da gravidade. Por sua vez, essa massa pode

e, conseqüentemente, maior será a pressão exercida pela ser expressa como o produto entre a densidade do líquido, ρ ,

coluna de água acima dele. e o volume do cilindro, V. Já o volume, V, pode ser substituído

por A.h. Finalmente, cancelando A, que aparece nos

Outra característica importante dos líquidos é que a

pressão

dois lados da equação, obtemos a expressão desejada, exercida por eles comprime todos os pontos de seu interior e $P - P = \rho gh$, que também é conhecida como o Teorema de Stevin.

age em todas as direções e sentidos. A figura 7 representa

de
Stevin.

uma experiência simples para confirmar esse comportamento.

Note nessa figura que todos os medidores de pressão Segundo essa equação, a pressão no interior de um

encontram-se à mesma profundidade (ao mesmo nível) líquido é a soma de duas parcelas. Uma é a pressão

e registram o mesmo valor independentemente da orientação atmosférica, P_0 , que atua na superfície livre do líquido e P_0 do funil. Para um mesmo nível, além de a pressão ser igual, se transmite para todas as partes internas dele. A outra

ela atua em todas as direções e sentidos, seja de cima para parcela, ρgh , é a pressão exercida pela própria coluna de baixo, de baixo para cima ou lateralmente. líquido acima do ponto considerado. A título de exemplo,

Teoremas de Torricelli e Stevin

vamos usar a equação anterior para calcular a pressão
Quando dois líquidos não miscíveis e de densidades

em um ponto a uma profundidade $h = 10 \text{ m}$ abaixo
da diferentes são colocados em dois vasos
comunicantes, cujas

superfície do mar. Considerando $P = 1,0 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
(1 atm), o bocas estão expostas a um mesmo ambiente,
observamos

$\rho = 1,0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ e $g = 10 \text{ m/s}^2$ e substituindo
esses água que os níveis atingidos nos dois ramos são
diferentes. Esse valores na equação, obtemos: é o caso
ilustrado na figura 9, em que um pouco de água e

$P = 1,0 \times 10^5 + 1,0 \times 10^3 \cdot 10 \cdot 10$ um pouco de óleo
foram colocados em um tubo, na forma

$\Rightarrow 1,0 \times 10^5 + 1,0 \times 10^5 = 2,0 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ de U,
aberto para a atmosfera.

Ou ainda, $P = 1 \text{ atm} + 1 \text{ atm} = 2,0 \text{ atm}$.

Veja que o valor da pressão exercida pela coluna de
10 m

de água coincide com o valor da própria pressão
atmosférica Óleo Óleo ao nível do mar, isto é, uma
coluna de 10 m de água exerce

uma pressão de 1 atm. h'

Memorize esse resultado, pois ele pode ser útil para você

calcular rapidamente o valor da pressão em um ponto dentro h_A h_B da água. Por exemplo, em um lago com 30 m de profundidade, a pressão no fundo vale 4 atm, pois 1 atm é devido à pressão

atmosférica (isso se o lago estiver ao nível do mar), e 3 atm

são devidos aos 30 m de coluna de água.

Figura 9: O óleo e a água não atingem o mesmo nível dentro

Outra conclusão muito importante que podemos tirar da

*do tubo
em U.*

equação anterior é a seguinte:

De acordo com a teoria exposta anteriormente, as



Todos os pontos situados em um mesmo nível, no interior de pressões P_A e P_B nos pontos A e B são iguais, pois esses

um mesmo líquido, em equilíbrio, estão sujeitos a pressões pontos acham-se sobre uma mesma linha horizontal e ambos

de mesmos valores. situam-se na água (o ponto B

também está em contato com o óleo). De acordo com a figura, podemos concluir que a

situações em que o líquido acha-se em recipientes curvos Essa igualdade de pressões é válida mesmo para densidade (ρ') do óleo é menor do que a densidade (ρ) da **FÍSICA** água, pois, para haver a igualdade entre as pressões P e P , ou com geometrias especiais, como o recipiente mostrado $_{AB}$ a coluna de maior altura (h') sobre o ponto B deve ser na figura 8. Esse recipiente é conhecido pelo nome de vasos comunicantes. Quando colocamos um líquido em um compensada pela maior densidade da água, cuja coluna (h)

recipiente desse tipo, e desde que todas as bocas estejam sobre o ponto A é menor. Para obter a relação matemática

expostas à mesma pressão externa (por exemplo, a pressão entre h e h' , devemos igualar as pressões P e P e utilizar $_{AB}$ atmosférica), observamos que o líquido atinge níveis iguais a Equação de Stevin.

nos pontos M, N, O e P são iguais à pressão atmosférica $P_P = P_P gh = P_A$. em todas as bocas dos vasos. Assim, na figura 8, as pressões $_{BOO} \Rightarrow + \rho + \rho'gh' \Rightarrow ph = \rho'h'$

Os pontos R, S, T e U também estão sujeitos a pressões

Podemos usar essa relação para determinar a densidade

iguais, cujo valor é a soma da pressão atmosférica P_0 com a pressão exercida pela coluna de líquido, de altura h , indicada e das alturas h e h' . Por exemplo, para $h = 15 \text{ cm}$ e

na figura. As pressões nos pontos X, Y e Z também são

$h' =$
 $18 \text{ cm},$
temos:

iguais, sendo iguais à soma de P_0 com a pressão exercida

pela coluna de líquido de altura H . $1,0 \cdot 15 = \rho' \cdot 18 \Rightarrow$
 $\rho' = 0,83 \text{ g/cm}^3$

Vamos finalizar esta seção analisando a figura 10, que

M N O P mostra um manômetro de tubo em U, usado para medir

a pressão de um gás encerrado em um recipiente. Dentro

do tubo em U, existe mercúrio. No lado esquerdo do tubo, R S T U o mercúrio sofre a ação da pressão P , exercida pelo gás. G

No lado direito do tubo, o mercúrio sofre a ação da pressão

H atmosférica P . Observe que o gás empurra o mercúrio para o

baixo, forçando a elevação da coluna de mercúrio no lado oposto.

Os valores de pressão em pontos situados em um mesmo

X nível do mercúrio são iguais. Então, a pressão no ponto 1 (P) Y Z G

é igual à pressão no ponto 2, imposta pelos efeitos do peso da

Figura 8: No interior de um líquido em repouso, as pressões em coluna de mercúrio sobre o ponto 2 e da pressão atmosférica

um mesmo nível são iguais. sobre a superfície livre do líquido. Assim, concluímos que $P = P_{atm}$







1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24





■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

.

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■





1

2

3

4

5

6

7

8

1

2



3



4



5

6

7

||

||

||

||

|

|

■

|

|

|

|

|



|

-

"



|



|

|

|

|

■

|

■

|

■

■

■

■

||

||











—

!

—

||





—

—

—

—

—

||

||

|

|

|

|

|

|

|

|



|



|





—

|

—

|

—

—

|

—

—

—

|

—

|

—

—

|

||

||

||

||

||

||

||

||

||

||

|

||

||

|

||

||

||

||

||

|

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

I

I

I

I

I

I

I

I

I

I

I











—



—





Frente B Módulo 11

Para calcular esses efeitos, é conveniente usar, como unidade *Resolução:* de pressão, o mmHg (milímetros de mercúrio). Digamos que

A) A água está em equilíbrio tanto no interior do tubo

seja igual a 680 mmHg (como P quanto dentro do recipiente. Logo, podemos afirmar é menor do que 760 mmHg, o a coluna h seja igual a 400 mm e que a pressão atmosférica

o ambiente deve estar acima do nível do mar). Então, que as pressões em dois pontos do interior do líquido,

a pressão do gás é: que se encontram em um mesmo nível, são iguais.

$P = (400 + 680) \text{ mmHg}_G$ (ponto A da figura a seguir) e da pressão da água Esse é o caso da pressão na superfície livre da água

$\Rightarrow P = 1\,080 \text{ mmHg} = 1,42 \text{ atm}_G$ dentro do tubo, na posição em que o nível é o mesmo

da superfície livre (ponto B).

Gás

h

1 2

h

Figura 10: Manômetro de tubo em U. A B

PARA REFLETIR A pressão no ponto A é igual à pressão atmosférica,

Considere uma garrafa PET com água, ($P_0 = 1,0 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, ao nível do mar). A pressão



aberta na boca e com um furo na parede. em B é a soma da pressão do ar dentro do tubo



Por que você interrompe o jato de água que (valor pedido) com a pressão exercida pela coluna de



sai pelo furo quando você tampa a boca da



garrafa? Por que o jato também é interrompido em que água no tubo. Essa última parcela é dada por ρgh , caso você deixe a garrafa cair em queda livre? ρ é a densidade da água ($1,0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$),



g é a aceleração da gravidade (10 m/s^2), e h é a altura da coluna de água no tubo. O tubo tem 1 m de

EXERCÍCIO RESOLVIDO comprimento, de

forma que 40 cm (0,40 m) é uma

boa estimativa para h . Igualando as pressões em A e B

e substituindo os valores citados, obtemos:

01. Durante uma aula de laboratório, um professor realizou $P = P \Rightarrow P + \rho gh = P_{B A 0}$ a experiência ilustrada na figura a seguir. Primeiro,

ele sugou a água de um recipiente utilizando um tubo $\Rightarrow P + 1,0 \times 10^3 \cdot 10 \cdot 0,40 = 1,0 \times 10^5$

transparente, aberto nas extremidades, e com cerca de $5 \Rightarrow P = 0,96 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ 1 m de comprimento. Em seguida, ele tampou rapidamente

a extremidade superior do tubo com a mão. Por último, Observe que o valor da pressão P é igual a 96% da

o professor retirou o tubo do recipiente e mostrou aos pressão atmosférica. Em outras palavras, ao succionar

alunos que a água no tubo continuou em repouso, sem a água, o professor reduziu 4% da pressão do ar

derramar nem um pouco pela extremidade inferior. dentro do tubo. Por isso, a pressão atmosférica,

que atua na superfície livre da água do recipiente,

“empurrou” o líquido para dentro do tubo. É dessa

forma que conseguimos tomar uma bebida com um

canudinho. De fato, é a pressão atmosférica que

empurra a bebida para dentro da nossa boca.

B) Depois que o tubo é retirado do recipiente, a água não

derrama pela extremidade de baixo do tubo porque a

pressão atmosférica atua de baixo para cima sobre a água, impedindo-a de cair. Nessa situação, de forma semelhante àquela discutida no item (A), a pressão

A) Avaliar a pressão do ar no interior do tubo. atmosférica que age externamente é equilibrada pela

B) Explicar por que a água coletada no tubo não derrama soma da pressão do ar dentro do tubo com a pressão

depois que esse é retirado do recipiente. exercida pela

coluna de água.



28 Coleção Estudo

.

.

.

.







!

-

-

-

-

!

-

-



.

.

.

.

■



||

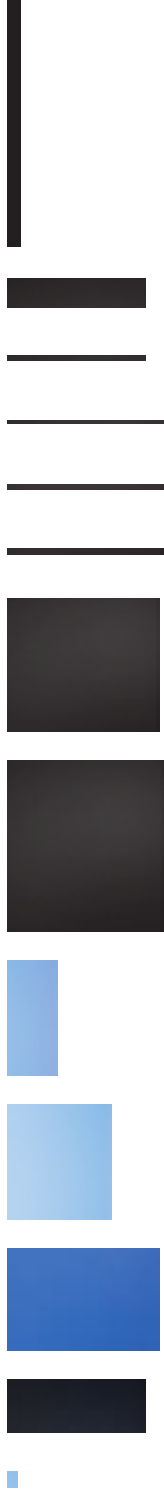


||

|

■







Teoremas de Torricelli e Stevin

EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO 03. (UFMG–

2007) Um reservatório de água é constituído de duas partes cilíndricas, interligadas, como mostrado na

figura.

01. (UFRGS–2006) Em uma aula de laboratório, os alunos A área da seção reta do cilindro inferior é maior que a

realizam um experimento para demonstrar a relação linear

do cilindro superior.

existente entre a massa e o volume de diferentes cilindros

Inicialmente, esse reservatório está vazio. Em certo

maciços feitos de vidro. Em seguida, repetem o mesmo

instante, começa-se a enchê-lo com água, mantendo-se

experimento com cilindros de aço, alumínio, chumbo

uma vazão constante.

e cobre. No gráfico a seguir, cada reta corresponde

ao resultado obtido para cada um dos cinco materiais Assinale a alternativa cujo gráfico **MELHOR** representa a

citados. pressão, no fundo do reservatório, em função do tempo,

desde o instante em que se começa a enchê-lo até o

$m \text{ (g)}$

instante em que ele começa a transbordar.

1

80 2

60

40

4

20 5

0 2 4 6 8 V (cm³)

A reta que corresponde ao resultado obtido para o chumbo

é a de número A) Pressão

A) 1.

B) 2. **FÍSICA**

C) 3.

D) 4.

Tempo

E) 5.

02. B) Pressão (UFMG–2006) José aperta uma tachinha entre os dedos,

como mostrado nesta figura:

Tempo

C)
Pressão

A cabeça da tachinha está apoiada no polegar e a ponta, no indicador.

Sejam $F(i)$ o módulo da força e $p(i)$ a pressão que a tachinha faz sobre o dedo indicador de José. Sobre o polegar, essas grandezas são, respectivamente, $F(p)$ e $p(p)$. Tempo Considerando-se essas informações, é **CORRETO** afirmar que D) Pressão

- A) $F(i) > F(p)$ e $p(i) = p(p)$.
- B) $F(i) = F(p)$ e $p(i) = p(p)$.
- C) $F(i) > F(p)$ e $p(i) > p(p)$.
- D) $F(i) = F(p)$ e $p(i) > p(p)$. Tempo

Editora Bernoulli 29

Frente B Módulo 11

04. (Cesgranrio) O tubo em U, aberto, contém mercúrio e **05.** (PUCPR) A figura mostra um tubo em U, aberto nas duas

águas. Qual dos gráficos **MELHOR** indica a variação da extremidades. Esse tubo contém dois líquidos que não se

pressão entre os pontos 1, 2, 3, 4 e 5? misturam e que têm densidades diferentes. Sejam p_M e

p_N as pressões nos pontos M e N, respectivamente. Esses

1 pontos estão no mesmo nível, como indicado pela linha

5 tracejada, e as densidades dos dois líquidos são tais que

$$2 d = 2 d . M N$$

A) p

Nessas condições, é **CORRETO** afirmar que

A)

 p $=$ $2p$ $\cdot \frac{M}{N}$ N 1 2 3 4 5 B) $p_M = p_N$.

C)

 p_M $>$ p_N .B) p D) $p < p \cdot \frac{M}{N}$

E) Nada se pode afirmar a respeito das pressões.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

1 2 3 4 5 **01.** (UERJ–2010) A figura a seguir representa um fio AB de

comprimento igual a 100 cm, formado de duas partes

C) p homogêneas sucessivas: uma de alumínio e outra,

mais densa, de cobre. Uma argola P que envolve o fio é

deslocad.

de
A
para
B.

A P B

Durante esse deslocamento, a massa de cada pedaço

1 2 3 4 5 de comprimento AP é medida. Os resultados
estão

representados no gráfico a seguir:

D) p

)

96

M.
(g)

16

1 2 3 4 5

0 40 100

AP (cm)

E) p

A razão entre a densidade do alumínio e a densidade do
cobre é aproximadamente igual a

A)
0,1.

B)
0,2.

C)

1 2 3 4 5 D) 0,4.

30 Coleção Estudo

Teoremas de Torricelli e Stevin

02. (UFMG–2007) Para se realizar uma determinada **04.** (PUC Rio–2010) Um avião utilizado na ponte aérea entre

experiência, Rio e São Paulo é capaz de voar horizontalmente com

- coloca-se um pouco de água em uma lata, com uma uma carga máxima de 62 823,0 kg. Sabendo que a área

abertura na parte superior, destampada, a qual é, somada de suas asas é de 105,4 m², é **CORRETO** afirmar

em seguida, aquecida, como mostrado na figura I; que a diferença de pressão nas asas da aeronave, que

promove a sustentação durante o voo, é de

- depois que a água ferve e o interior da lata fica

totalmente preenchido com vapor, esta é tampada e (Considere $g = 10,0 \text{ m/s}^2$). retirada do fogo; A) 2 980,2 Pa.

- logo depois, despeja-se água fria sobre a lata e B) 5 960,4 Pa.

observa-se que ela se contrai bruscamente, como C) 6 282,3 Pa. mostrado na figura II. D) 11 920,8 Pa.

E) 12 564,6 Pa.

05. (Cesgranrio) Uma chapa de metal, homogênea e fina

(de espessura constante), é cortada para formar as faces

de dois cubos ocultos C_1 e C_2 , sendo que a aresta de C_2 é o dobro da aresta de C_1 .



2a

a

I II C_1 C_2

Com base nessas informações, é **CORRETO** afirmar que,

A densidade do cubo menor é d . Logo, a densidade do cubo maior é

na situação descrita, a contração ocorre porque

cubo
maior
é

A) a água fria provoca uma contração do metal das **FÍSICA**

A) $2d$. D) $d/4$.

paredes da lata.

B) d . E) $d/8$.

B) a lata fica mais frágil ao ser aquecida.

C)
 $d/2$.

C) a pressão atmosférica esmaga a lata.

D) o vapor frio, no interior da lata, puxa suas paredes **06.** (UFPE) O casco de um submarino suporta uma pressão

para dentro. externa de até 12,0 atm sem se romper. Se, por acidente,

o submarino afundar no mar, a que profundidade,

03. (UECE) Dois líquidos não miscíveis, X e Y, são derramados em metros, o casco se romperá?

sucessivamente em um vaso cilíndrico. O líquido X, A) 100 D) 130

de massa específica $0,8 \text{ g/cm}^3$, é derramado primeiro, B) 110 E) 140

até atingir $1/4$ do volume do vaso.

C)

120

A seguir, o líquido Y, de massa específica $0,5 \text{ g/cm}^3$,

é derramado até encher completamente o vaso. Se

m_x **07.** (UFU-MG-2006) Ao usarem elevadores, algumas

e m_y são as massas dos líquidos X e Y, respectivamente, pessoas apresentam problemas nos ouvidos devido a

a razão m_x/m_y vale mudanças de pressão. Se a pressão interna do tímpano

não mudar durante a subida, a diminuição na pressão

externa causa o aparecimento de uma força direcionada

$Y \approx 0,6 \text{ cm}$ para fora do tímpano. Considere a área do tímpano de A , a densidade do ar admitida constante e igual a

$1,3 \text{ gramas/litro}$, $g = 10 \text{ m/s}^2$ e as pressões interna e externa do tímpano inicialmente iguais. Quando o

X elevador sobe 100 m , a força exercida sobre o tímpano,

nas condições anteriores, seria de

A) $8/15$. A) $7,8 \times 10^{-2} \text{ N}$.

B) $4/15$. B) $9,7 \times 10^2 \text{ N}$.

C) $8/5$. C) $7,8 \times 10^2$ N.

D) $4/3$. D) $9,7 \times 10^{-2}$ N.

Editora Bernoulli **31**

Frente B Módulo 11

08. (UFSC) Assinale a(s) proposição(ões) **CORRETA(S)**. **10.** (UEL-PR) Para medir a pressão p exercida por um gás

01. Usando um canudinho, seria muito mais fácil tomar contido num recipiente, utilizou-se um manômetro de

um refrigerante na Lua do que na Terra, porque a mercúrio, obtendo-se os valores indicados na figura.

força de atração gravitacional na Lua é menor. A pressão atmosférica local medida por um barômetro é

02. É possível a medida aproximada da altitude pela de 750 mmHg. O valor de p , em mmHg, é

variação da pressão atmosférica.

04. Uma pessoa explodiria se fosse retirada da atmosfera

terrestre para o vácuo. A pressão interna do corpo

seria muito maior do que a pressão externa (nula,

no vácuo) e “empurraria” as moléculas para fora

do corpo. Esse é um dos motivos pelos quais os Hg astronautas usam roupas especiais para missões fora Gás

170 mm

do ambiente pressurizado de suas naves.

08. Para repetir a experiência realizada por Evangelista

Torricelli, comparando a pressão atmosférica com

a pressão exercida por uma coluna de mercúrio, 20 mm é necessário conhecer o diâmetro do tubo, pois a pressão exercida por uma coluna líquida depende do

seu volume.

A) 150. D) 900.

16. Vários fabricantes, para facilitar a retirada da

tampa dos copos de requeijão e de outros produtos, B) 170. E) 940. introduziram um furo no seu centro, selado com C) 750. plástico. Isso facilita tirar a tampa porque, ao retirar o

selo, permitimos que o ar penetre no copo e a pressão **11.** (VUNESP) A figura mostra dois líquidos, A e B, atmosférica atue, também, de dentro para fora. incompressíveis e não miscíveis, em equilíbrio num

32. Quando se introduz a agulha de uma seringa numa tubo em forma de U, de seção constante, aberto nas

veia do braço, para se retirar sangue, este passa da extremidades. veia para a seringa devido à diferença de pressão

entre o sangue na veia e o interior da seringa.

64. Sendo correta a informação de que São Joaquim se situa a uma altitude de 1 353 m e que Itajaí está ao B h_B

nível do mar (altitude = 1 m), podemos concluir que A h₁ a pressão atmosférica é maior em São Joaquim, já

que ela aumenta com a altitude. h₂

Soma ()

09. Se a densidade do líquido A for duas vezes maior que a (FUVEST-SP) Um avião que voa a grande altura é

pressurizado para conforto dos passageiros. Para evitar sua do líquido B, a altura h_2 , indicada na figura, será

explosão, é estabelecido o limite máximo de 0,5 atmosfera A) $h_1 - (h_B/2)$. D) $2h_1 - h_B$.

para a diferença entre a pressão interna no avião e a B) $h_1 - h_B$. E) $(h_1/2) - h_B$. externa. O gráfico representa a pressão atmosférica P em C) h função da altura H acima do nível do mar. Se o avião voa a $1 - 2h_B$.

os passageiros ficam sujeitos a uma pressão igual à que **12.** (UFMG) Os fundos dos vasos V₁, V₂, V₃ e V₄ têm a mesma h_1 uma altura de 7 000 metros e é pressurizado até o limite,

2 3 4

reina na atmosfera a uma altura de, aproximadamente, área. Os vasos V₁ e V₂ estão cheios de mercúrio e V₃ e V₄, 1 2 3 4

de água, até a mesma altura, conforme ilustra a figura.

P (atm)

1,00 V₁ V₂ V₃ V₄

0,80

0,60

0,40 p_1 p_2 p_3 p_4

0,20 Quanto às pressões p_1 , p_2 , p_3 e p_4 , exercidas pelos líquidos 1 2 3 4

nos fundos dos vasos V_1, V_2, V_3 e V_4 , respectivamente,

O pode-se afirmar que 4 000 8 000 12 000 H (m) A) $p_1 > p_2 > p_3 > p_4$ B) $p_1 = p_2 = p_3 = p_4$ C) $p_1 > p_2$ e $p_3 > p_4$ D) $p_1 = p_2$ e $p_3 = p_4$ E) $p_1 > p_2$ e $p_3 > p_4$

A) 0 m. C) 2 000 m. E) 7 000 m. B) $p_1 > p_2$ e $p_3 > p_4$ D) $p_1 = p_2$ e $p_3 = p_4$

B) 1 000 m. C) $p_1 > p_2$ e $p_3 > p_4$ D) 5 500 m. E) $p_1 = p_2$ e $p_3 = p_4$

32 Coleção Estudo

Teoremas de Torricelli e Stevin

13. (UFV-MG) O recipiente ilustrado na figura contém água **18.** (UFC) A figura a seguir representa um tubo aberto em

em desnível e está aberto à atmosfera em N. forma de U, com área da seção reta A, que contém um

líquido de densidade ρ . Dentro do tubo, no seu ramo L B direito, há um objeto de altura d, de área de seção reta N igual à do tubo e de densidade $\rho_0 = 8\rho_L$, que repousa sobre a superfície do líquido.

A C

h No ramo esquerdo do tubo, a superfície livre do líquido está a uma altura h acima da sua superfície no ramo direito. **CALCULE** a razão h/d quando o sistema está em D equilíbrio. Despreze qualquer atrito.

A pressão em B é

A) maior que em A. D) igual à pressão em A.

B) maior que em C. E) menor que em A.

C) maior que em D. h

- 14.** (PUC Minas) Dois tubos iguais contêm: um, azeite de d oliva, e o outro, água. Os líquidos têm o mesmo peso, mas alcançam as alturas de 50 cm e 46 cm, respectivamente. **DETERMINE** a densidade do azeite de oliva.

Dado: densidade da água = 1 g/cm³. **SEÇÃO ENEM**

- 15.** (UnB-DF) Ao nível do mar, o experimento de Torricelli

para medir a pressão atmosférica usando-se o mercúrio **01**. Júpiter, conhecido como gigante gasoso, perdeu uma de

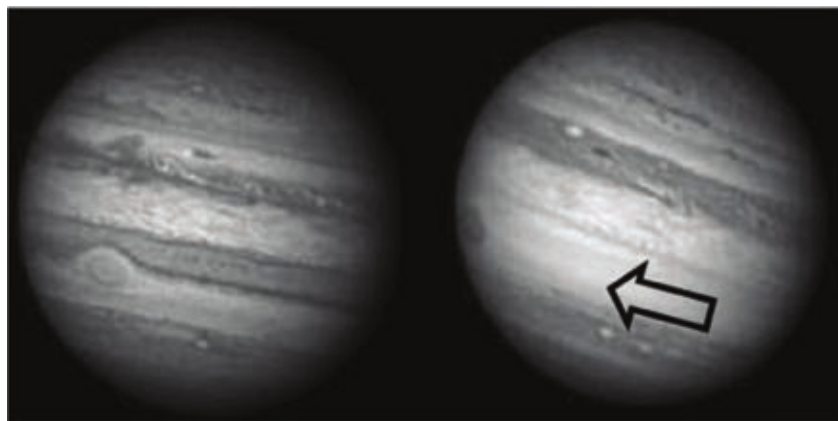
metálico, cuja densidade é igual a $13,6 \text{ g/cm}^3$, apresenta

uma coluna de mercúrio de 76 cm. Em um local de suas listras mais proeminentes, deixando o seu hemisfério

Brasília, situado 1 000 m acima do nível do mar, o mesmo sul estranhamente vazio. Observe a região em que a faixa

experimento apresenta uma coluna de mercúrio com sumiu, destacada pela seta. **FÍSICA**

altura igual a 67 cm. **CALCULE**, em decímetros, a altura



da coluna nesse local de Brasília se em vez do mercúrio metálico fosse usado o mercurocromo, cuja densidade é igual a $0,99 \text{ g/cm}^3$. Despreze a parte fracionária de seu resultado, caso exista.

16. (UFMG) Um recipiente cilíndrico, cuja base tem área igual a $0,20 \text{ m}^2$, está cheio de água até a altura de $0,80 \text{ m}$.

Considerando $g = 10 \text{ m/s}^2$ e a densidade da água igual

a $1,0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, **DETERMINE** o valor da pressão

hidrostática no fundo do recipiente.

17. (Unicamp-SP) Um mergulhador persegue um peixe a faixas escuras em sua atmosfera – uma no hemisfério A aparência de Júpiter é tipicamente marcada por duas

5,0 m abaixo da superfície de um lago. O peixe foge

norte e outra no hemisfério sul. Como o gás está

da posição A e se esconde em uma gruta na posição B,

conforme mostra a figura a seguir. A pressão atmosférica constantemente em movimento, o desaparecimento da

na superfície da água é igual a $p_0 = 1,0 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ faixa no planeta relaciona-se ao movimento das diversas .

Adote $g = 10 \text{ m/s}^2$ camadas de nuvens em sua atmosfera. A luz do Sol, .

refletida nessas nuvens, gera a imagem que é captada

pelos telescópios, no espaço ou na Terra.

O desaparecimento da faixa sul pode ter sido determinado

5 m por uma alteração

1 m

A) na temperatura da superfície do planeta.

B A

B) no formato da camada gasosa do planeta.

C) no campo gravitacional gerado pelo planeta.

A) Qual a pressão sobre o mergulhador?

D) na composição química das nuvens do planeta.

B) Qual a variação de pressão sobre o peixe nas posições

A e B? E) na densidade das nuvens que compõem o planeta.

Editora Bernoulli 33

Frente B Módulo 11

02. (Enem–2004) Para medir o perfil de um terreno, um **03.** A figura mostra uma garrafa térmica de pressão, na qual

mestre de obras utilizou duas varas (V_I e V_{II}), iguais a tampa, ao ser pressionada pelo dedo da pessoa, gera

e igualmente graduadas em centímetros, às quais um acréscimo de pressão do ar sobre a superfície livre

foi acoplada uma mangueira plástica transparente, do café, permitindo a saída da bebida através de um tubo

parcialmente preenchida por água (figura a seguir). Ele vertical.

fez 3 medições que permitiram levantar o perfil da linha

que contém, em sequência, os pontos P_1 , P_2 , P_3 e P_4 .

Em cada medição, colocou as varas em dois diferentes

pontos e anotou suas leituras na tabela a seguir. A figura Diafragma representa a primeira medição entre P_1 e P_2 .

V_{II} Tubo

239 V_I Ar Nível de água $h = 10$ cm Superfície livre na mangueira
na mangueira 164 164

(Terreno fora de escala)

Ao nível do mar, a pressão atmosférica vale 1 atm. Esse

VARA I VARA II DIFERENÇA valor equivale aproximadamente à pressão exercida por

MEDICÃO ($L_I - L_{II}$) uma coluna de 10 metros de água. Nessas condições, **PONTO LEITURA PONTO LEITURA L_I (cm) L_{II} (cm) (cm)** para fazer um esforço mínimo, o suficiente para o café

1ª P₁ 239 P₂ 164 75 sair da garrafa térmica mostrada na figura, a pressão na

2ª superfície livre deve ser P₂ 189 P₃ 214 –25

3ª A) exatamente igual a 0,9 atm. P₃ 229 P₄ 174 55

B) exatamente igual a 1,0 atm.

Ao preencher completamente a tabela, o mestre de obras C) ligeiramente maior que 1,0 atm.

determina o seguinte perfil para o terreno: D) exatamente igual a 1,1 atm.

A) E) um pouco maior que 1,1 atm.

P GABARITO P₁ P₂ P₃ P₄

B) Fixação

01. A 02. D 03. C 04. B 05. D

P Propostos P₁ P₂ P₃ P₄

01. C 09. B

C) 02. C 10. D

03. A 11. A

04. B 12. D

P P P P 05. C 13. E_{1 2 3 4}

06. B 14. 0,92 g/cm³

D)

07. A 15. 92 dm

08. Soma = 54 16. 8 x 10³ Pa

17. A) 1,5 x 10⁵ N/m²

P P P P_{1 2 3 4} B) Zero

E) 18. $h/d = 8$

Seção Enem

01. E 02. A 03. C

P₁ P₂ P₃ P₄

34 Coleção Estudo FÍSICA MÓDULO FRENTE Teoremas de Pascal e 12 B Arquimedes

No módulo anterior, estudamos o Princípio Fundamental As máquinas hidráulicas, como

elevadores e prensas

da Hidrostática, representado pela equação de Stevin, com a hidráulicas, funcionam com base no Princípio de Pascal.

qual podemos calcular as pressões exercidas por um líquido Uma máquina hidráulica é um dispositivo capaz de multiplicar

em equilíbrio. Neste módulo, discutiremos outros dois pilares o efeito de uma força por meio da transmissão da pressão

da Hidrostática, os Princípios de Pascal e de Arquimedes, bem exercida por essa força em um líquido. Para explicar o

como uma série de aplicações sobre esses dois fundamentos. funcionamento dessas máquinas, vamos considerar a figura 2,

que representa um elevador hidráulico, constituído
por dois

cilindros dotados de êmbolos, interligados e cheios de
óleo.

PRINCÍPIO DE PASCAL

O francês Blaise Pascal, que viveu no século XVI, fez importantes descobertas na Matemática e na Física.

No campo da Mecânica dos Fluidos, a sua contribuição

mais

a A

relevante, hoje conhecida como Princípio de Pascal, pode

ser assim enunciada:

F



A pressão exercida sobre um líquido em equilíbrio se transmite integralmente a todos os pontos do líquido e f às paredes do recipiente no qual o líquido está confinado.

A figura 1 ilustra uma experiência simples para demonstrar o Óleo

Princípio de Pascal. Nela, temos um cilindro cheio de líquido, um

balão de borracha conectado ao cilindro e cinco manômetros

também conectados ao cilindro em diferentes posições. *Figura 2: A pressão exercida pela pessoa é transmitida pelo óleo*

Dentro do balão de borracha, há um pouco de ar aprisionado. *para a outra extremidade do elevador.*

Esse ar exerce uma pressão sobre a superfície do líquido. De acordo com o Princípio de Pascal, a

pressão exercida

Apertando o balão, a pressão exercida pelo ar sobre a superfície pela pessoa é transmitida integralmente através do óleo

do líquido aumenta. Os cinco manômetros, que se acham para o outro lado do elevador. Por isso, a razão entre a força

distribuídos em diferentes posições nas paredes do cilindro, exercida pela pessoa e a área do êmbolo menor, f/a , deve ser

registram o mesmo aumento de pressão. É justamente essa igual à razão entre a força que aparece no lado oposto e a

transmissão integral da pressão a todos os pontos do líquido área do êmbolo maior, F/A . Explicitando a força f , obtemos:

que constitui a essência do Princípio de Pascal.

$$\frac{F}{A} = \frac{f}{a} \Rightarrow f = F \frac{a}{A}$$

$$A \text{ a } a$$

Para erguer o carro da figura 2 com velocidade constante,

a força F exercida pelo êmbolo deve ter a mesma intensidade que o peso do carro. Nessas condições, se a massa do

carro for igual a uma tonelada, então F deve ser igual a

1 000 kgf. Considerando as áreas $A = 2,0 \text{ m}^2$ e $a =$

Líquido a intensidade da força f necessária para erguer o carro será:

confinado

$$f = \frac{a}{A} F = \frac{0,020}{1,000} \text{ kgf} =$$

$$A = 2,0 \text{ m}^2 \quad 10 \text{ kgf}$$

Note que o módulo da força f é 100 vezes menor do que

Figura 1: O aumento de pressão exercida sobre a superfície do o de F, porque a área A é 100 vezes maior do que a área a. líquido é transmitido a todos os outros pontos do líquido. Na prática, uma máquina com um quociente A/a muito

Editora Bernoulli 35

Frente B Módulo 12

grande não é viável, pois o óleo, sendo incompressível, deve Uma experiência simples para comprovar o Princípio

apresentar os mesmos deslocamentos volumétricos nos dois de Arquimedes está ilustrada na figura 3. Na primeira

cilindros do elevador. Assim, como os cilindros apresentam etapa da experiência, o peso de uma pedra é registrado

áreas diferentes, os seus deslocamentos lineares são por meio de um dinamômetro. Digamos que o valor diferentes. Nesse exemplo, para que o carro fosse erguido obtido seja $P = 3,5 \text{ N}$. Na sequência, a pedra é

1,0 m, o êmbolo menor deveria ser abaixado 100 metros. mergulhada em um recipiente com água. Nessa condição,

É claro que um deslocamento tão grande assim é impraticável. o dinamômetro registra um valor menor, por exemplo,

Portanto, nas máquinas hidráulicas reais, o quociente A/a $P = 3,0 \text{ N}$, que é o modulo do peso aparente da pedra. ^A

é limitado. Ainda que isso comprometa um pouco a vantagem É claro que o peso real da pedra continua sendo igual a

mecânica do sistema, o deslocamento do êmbolo em que 3,5 N. Porém, a água exerce uma força de empuxo de f módulo $E = 0,50 \text{ N}$ sobre a pedra, de forma que a força atua não é exageradamente grande. Em algumas máquinas exercida pelo dinamômetro sobre a pedra, $P = P E$, possui hidráulicas, há uma alavanca atuando sobre o êmbolo menor. ^A — módulo igual a 3,0 N. Por último, obtemos o resultado mais A vantagem mecânica dessa alavanca, associada à da importante dessa experiência: a água coletada no recipiente máquina hidráulica, permite a obtenção de uma vantagem menor (água deslocada pela pedra) possui

um peso de mecânica global praticável e significativa. 0,50 N, que é exatamente o módulo da força de empuxo,

Podemos, também, usar o Princípio da Conservação da obtido pela diferença entre as duas leituras do dinamômetro.

Energia para explicar por que existe uma diferença entre

os deslocamentos lineares dos êmbolos em uma máquina

hidráulica. De acordo com esse princípio, o trabalho realizado

pela força no lado do êmbolo maior ($F \cdot d$) deve ser igual ao

trabalho realizado pela força no outro lado ($f \cdot D$). Como F é

maior do que f , então D deve ser maior do que d . No exemplo

discutido anteriormente, como F é 100 vezes maior do que f , D deve ser 100 vezes maior do que d .



PARA REFLETIR



Por que você, atrás de uma barragem,



Figura 3: O módulo do empuxo (calculado como a diferença



seria capaz de reter toda a água da represa,



das leituras no dinamômetro) é igual ao módulo de peso do



simplesmente tampando com o dedo um líquido deslocado. buraco existente na barragem?



Arquimedes realizou experiências parecidas com a descrita anteriormente quando tentava descobrir uma maneira de calcular a força de empuxo exercida sobre objetos imersos na água.

PRINCÍPIO DE ARQUIMEDES Muitos séculos depois, o Princípio de Arquimedes foi demonstrado

teoricamente a partir da equação de Stevin. Considere um bloco de altura h e seção transversal de área A , imerso em um líquido

Empuxo de densidade ρ , como mostra a figura 4.

Quando você se encontra dentro de uma piscina com água, P_0 o líquido exerce sobre seu corpo uma força denominada

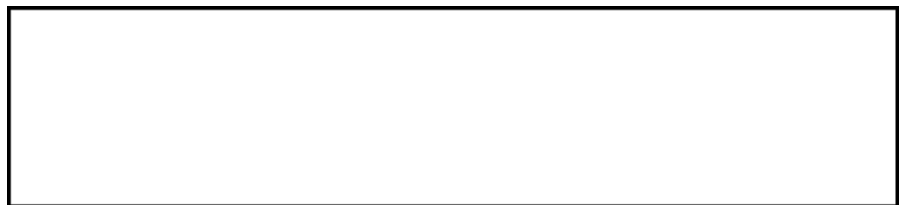
empuxo que age de baixo para cima sobre você. Por isso, F_s embora seu peso continue sendo exatamente o mesmo, h_s você se sente mais leve dentro da água do que fora dela.

O grego Arquimedes, que viveu por volta do ano 400 a.C., h_1 foi o primeiro a estudar esse fenômeno,

formulando o que $E = F - F_{1s}$

hoje conhecemos como o Princípio de Arquimedes, cujo

enunciado é o seguinte:



Todo corpo imerso em um fluido (líquido ou gás) sofre a ação

de uma força de empuxo exercida pelo fluido, cujo sentido

é de baixo para cima e cujo módulo é igual ao módulo do

Figura 4: O empuxo se deve à diferença entre as forças exercidas

peso do fluido deslocado pelo corpo.

pelo líquido na face inferior e superior do objeto.

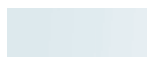
1. 

2. 

3. 

4. 

5. 

6. 

7. 

8. 

9. 

10. 

11. 

12. 

13. 

14. 

15. 

16. 

17. 

18. 

19. 

20. 

■

■

■

■

■



■



■



■



■



■

■

■

■

■

■

■

■



Teoremas de Pascal e Arquimedes

De acordo com a equação de Stevin, a pressão exercida Vamos analisar separadamente cada uma das situações

pelo líquido aumenta com a profundidade. Por isso, nas que podem ocorrer com o objeto.

faces laterais opostas do bloco, as pressões se cancelam. **Caso I: O objeto afunda**

Entretanto, o mesmo não acontece nas faces horizontais,

pois a pressão exercida sobre a face inferior é maior do que a

Para afundar, o módulo do peso do objeto deve ser maior

pressão exercida sobre a face superior, de modo que a força

do que o módulo do empuxo, de modo que, após ser solto,

exercida pelo líquido de baixo para cima é maior do que a

a resultante das forças que atuam sobre o objeto será força de cima para baixo. Assim, há uma força resultante

dirigida para baixo. Como o objeto está totalmente imerso no vertical, voltada para cima (o empuxo), atuando sobre o

bloco. Os módulos das forças exercidas pelo líquido sobre líquido, temos $V = V$. Assim, para o peso ser maior do que ρ_{LD}

as faces inferior e superior do bloco são: o empuxo, devemos ter $\rho > \rho_p$. Esse resultado é bastante ρ_L

intuitivo, já que pode ser observado em várias situações do

$F = (P + \rho_{gh}) \cdot A$ e $F_{gh} = \rho_{gh} \cdot A$ so $\rho = (P + \rho_{SI} \rho_I$ nosso dia a dia, como o afundamento de uma pedra ou de

Nessas equações, h uma esfera de chumbo jogadas na água. e h são as profundidades do líquido ρ_{SI}

nos níveis onde situam-se as faces superior e inferior,

Caso II: O objeto sobe respectivamente. A diferença entre essas forças representa

o empuxo do líquido sobre o cilindro: Para o objeto subir, o módulo de seu peso deve ser menor

$E = F$ do que o módulo do empuxo, pois, assim, a resultante das $- F = \rho_{\text{L}} g A(h - h_{\text{IS}})$ forças que atuam sobre o objeto será dirigida para cima.

Note que $h - h_{\text{IS}}$ é a altura h do bloco, de forma que $\rho_{\text{L}} A h$ é o volume V do bloco. Como esse é também o movimento de subida de um pedaço de madeira abandonado

volume do líquido deslocado, concluímos que $\rho_{\text{L}} V$ é a massa dentro da água. Chegando à superfície, o objeto passa a

do líquido deslocado, e que o módulo do empuxo $E = \rho_{\text{L}} V g$ flutuar. Isso significa que o módulo do empuxo diminui,

é igual ao módulo de peso do líquido deslocado, finalizando tornando-se igual ao módulo do peso do objeto, de forma que

a nossa demonstração. a resultante de forças seja nula. O motivo dessa diminuição

A seguir, vamos discutir as condições nas quais um corpo do empuxo é que o objeto, ao flutuar com apenas uma parte

afunda ou não em um líquido. submersa, desloca um volume de líquido menor do que

FÍSICA

aquele que era deslocado durante o movimento de subida.



Uma consequência muito importante que tiramos da



PARA REFLETIR igualdade entre o empuxo ($E = m g$) e o peso de um _{LD}



objeto flutuante ($P = m g$) é que a massa m do objeto é _{ooo}



Uma peça de ferro faria um bloco de madeira igual à massa m do líquido deslocado. A figura 5 mostra _{LD}



uma experiência simples para comprovar essa
igualdade.



flutuar mais baixo na água caso fosse presa



Um bloco de madeira é colocado cuidadosamente em
debaixo do bloco ou sobre ele?

um recipiente com água até o topo, que está sobre
uma

balança. A água deslocada é coletada por um
recipiente

menor. Observe que a leitura da balança não se altera
com

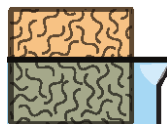
Condições de flutuação a colocação do
bloco de madeira, já que a massa de água que foi
deslocada é exatamente igual à massa do objeto

flutuante.

Imagine que você mergulha completamente um
objeto

de densidade ρ dentro de um líquido de densidade ρ_0 .

Em seguida, soltando o objeto, esse poderá afundar



no líquido, permanecer no mesmo lugar em que foi colocado ou ainda subir e emergir na superfície do líquido.

As intensidades do peso do objeto e do empuxo exercido pelo

líquido definirão que tipo de evento ocorrerá com o objeto.

Para discutirmos mais detalhadamente esse problema, vamos escrever o peso do objeto e o empuxo sobre ele usando as seguintes expressões:

$$P = m g = \rho V g ; E = m g = V g \quad \text{e} \quad \rho_{LD}$$

Nessas expressões, m e m_{LD} são as massas do objeto e o

do líquido deslocado, V e V_{LD} são os volumes do objeto e do líquido deslocado.

g é a aceleração da gravidade.

objeto flutuante.

Frente B Módulo 12

Podemos calcular a densidade de um objeto flutuante a O Princípio de Arquimedes pode ser usado tanto para

partir da densidade do líquido e de medições simples do corpos mergulhados em líquidos quanto para corpos imersos

volume do objeto e do volume submerso, sendo esse último em um gás, como um balão que se move na atmosfera da

nada mais do que o volume de líquido deslocado. Como as Terra. O Exercício Resolvido 01, apresentado a seguir, aborda

massas do objeto e da água deslocada são iguais, podemos essa situação. expressar a densidade do objeto por meio da seguinte relação:

$$m_{V_{LD}} = m_{V_{OLD}} \Rightarrow \rho V = \rho_o V_{OLD} \Rightarrow \rho_o = \rho_L V$$

EXERCÍCIO RESOLVIDO

Esse resultado matemático pode ser expresso com as **01.** Para impedir que um balão de gás leve escapasse da

seguintes palavras: a densidade de um objeto flutuante mão do seu filho, um pai amarrou o cordão do balão na

é uma fração da densidade do líquido, o que

corresponde ponta do dedo do garoto. Uma ideia melhor seria colocar

à razão entre o volume submerso e o volume total. um pequeno objeto de lastro na ponta do cordão. Assim,

Por exemplo, na figura 5, se o volume do objeto for $V = 50$ segurando o objeto, o garoto sentiria o balão flutuando preso cm^3 e o volume submerso for $V = 30 \text{ cm}^3$, então a densidade ρ_{LD} em sua mão. Caso o garoto soltasse o objeto, o conjunto

da madeira vale 60% da densidade da água, uma vez que balão / lastro cairia lentamente em direção ao solo. Calcular

30 cm^3 é 60% de 50 cm^3 . a massa mínima que esse objeto deve ter para impedir a

subida do balão, considerando os seguintes dados:

Caso III: O objeto permanece parado

massa do balão / gás / cordão: $m = 4,0 \times 10^{-3} \text{ kg}$;

volume do balão: $V = 5,0 \text{ L} = 5,0 \times 10^{-3} \text{ m}^3$;

Quando um objeto é abandonado dentro de um líquido e

permanece no mesmo lugar, significa que a resultante de Densidade do ar atmosférico: $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$; ρ_{atm} forças sobre ele é nula. Por isso, concluímos, para esse caso, Aceleração da gravidade: $g = 10 \text{ m/s}^2$. que o módulo peso do objeto é igual ao módulo do empuxo.

Para isso ocorrer, temos *Resolução*: $\rho = \rho_o$. Um exemplo dessa situação.

ocorre com um submarino em repouso ou em movimento. A figura a seguir mostra as forças atuantes sobre o

horizontal submerso no mar. Embora o casco seja de aço, sistema. Para o sistema ficar em repouso, o módulo

a densidade de um submarino é uma média ponderada do empuxo exercido pelo ar atmosférico sobre o balão

entre a densidade do aço, do ar, da água e de muitos outros deve ser igual à soma do módulo do peso do conjunto

corpos existentes na embarcação. Na verdade, o peso e a balão / gás / cordão com o módulo do peso do lastro.

densidade de um submarino podem ser alterados por meio

Empuxo Em Em Em mpuxo mp mp m uxo

da variação da massa em um tanque de lastro, que pode

ser preenchido com uma massa maior ou menor de água.

Dependendo do valor dessa massa, a embarcação pode emergir, submergir ou manter-se em um mesmo nível dentro

Peso do balão / gás / cordão

do mar. Observe a figura 6, que mostra um submarino em

corrente. O tanque de ar comprimido e a combinação certa de

aberturas e fechamentos de válvulas permitem encher

ou

esvaziar o tanque de lastro.

Peso do lastro

Periscópio Empuxo O peso do conjunto vale:

$$P = mg = 4,0 \times 10^{-3} \cdot 10 = 4,0 \times 10^{-2} \text{ N}$$

Válvulas Ar comprimido

O empuxo da atmosfera sobre o balão vale:

$$\text{de lastro Tanque } E = \rho_{\text{atm}} Vg = 1,25,0 \times 10 \cdot 10 = 6,0 \times 10^{-2} \text{ N}$$

Portanto, o peso do lastro deve ser de:



Tripulação

$$\text{Peso } P = E - P = (6,0 - 4,0) \times 10^{-2} = 2,0 \times 10^{-2} \text{ N}_L$$

I

Esse peso corresponde a uma massa de $2,0 \times 10^{-3} \text{ kg}$, ou seja, uma massa de apenas 2,0 gramas. Esse valor é



Figura 6: A variação do peso do submarino governa a muito pequeno, de maneira que o fato de segurar o lastro



dirigibilidade vertical da embarcação. com a mão não gera nenhum desconforto para o garoto.



38 Coleção Estudo





Teoremas de Pascal e Arquimedes

EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO 04. (Unimontes-

MG) Na figura a seguir, estão representados os blocos 1, 2 e 3, de respectivas densidades ρ_1, ρ_2, ρ_3

em um tanque com água, de densidade ρ_A . Os blocos

01. (UFV-MG-2009) A figura a seguir ilustra uma pessoa estão em repouso.

equilibrando um caminhão por meio de um elevador

hidráulico. O caminhão tem 10 toneladas de massa e

está apoiado sobre um pistão cuja a área é de 6 m^2 .

Sabendo que a área do pistão no qual a pessoa atua é de

30 cm^2 , é **CORRETO** afirmar que o valor do módulo da 2

força que esta pessoa exerce sobre o pistão é de 1

Considere os seguintes conjuntos de relações entre a

densidade de cada bloco e a da água do tanque:

I. $\rho_1 > \rho_A, \rho_2 > \rho_A, \rho_3 < \rho_A$

II. $\rho_1 = \rho_A, \rho_2 = \rho_A, \rho_3 < \rho_A$

III. $\rho_1 > \rho_A, \rho_2 = \rho_A, \rho_3 < \rho_A$

Marque a alternativa que indica o(s) conjunto(s) cujas

Considere a aceleração da gravidade local $g = 10 \text{ m/s}^2$. relações entre as densidades estão **CORRETAS**, de

A) 50 N. acordo com a situação descrita. C) 200 N.

B) 150 N. D) 500 N. A) I, apenas C) II e III, apenas

B) II, apenas D) I e III, apenas

02. (UFES) A tubulação da figura a seguir contém um líquido

incompressível que está retido pelo êmbolo 1 (de área igual **05.** (PUC Minas) Um bloco de madeira flutua em equilíbrio

a $10,0 \text{ cm}^2$) e pelo êmbolo 2 (de área igual a $40,0 \text{ cm}^2$).

Se a força F tem módulo igual a $2,0 \text{ N}$, a força F_2 , que o volume mergulhada. Sejam numa porção de água, com apenas uma parte de seu

mantém o sistema em equilíbrio, tem módulo igual a ρ_A a densidade da água,

ρ_M a densidade da madeira que constitui o bloco, V_E o **FÍSICA**

volume da porção do bloco que está acima do nível da água (parte emersa) e V o volume total do bloco.

A razão V_E/V é

A) ρ_M/ρ_A . C) $(\rho_A - \rho_M)/\rho_M$.

B) $(\rho_A - \rho_M)/\rho_A$. D) ρ_A/ρ_M .

2

A) $0,5 \text{ N}$. C) $8,0 \text{ N}$. E) $800,0 \text{ N}$.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS B) $2,0 \text{ N}$. D) $500,0 \text{ N}$.

03. (PUC RS) Um objeto flutua na água com metade do seu

volume imerso, conforme indica a figura. **01.** (FUVEST-SP) Considere o arranjo da figura a seguir,

em que um líquido está confinado na região delimitada pelos êmbolos A e B, de áreas $a = 80 \text{ cm}^2$ e $b = 20 \text{ cm}^2$, respectivamente.



$m_B A$

A respeito desse experimento, pode-se afirmar que A B Horizontal

A) o empuxo da água sobre o objeto tem intensidade igual à metade do peso do objeto.

B) o volume da água deslocada pelo objeto é igual ao volume do objeto.

C) a massa da água deslocada é igual à metade da massa do objeto.

O sistema está em equilíbrio. Despreze os pesos dos

D) o peso da água deslocada tem intensidade igual ao êmbolos e os atritos. Se $m_A = 4,0 \text{ kg}$, qual o valor de m_B ? peso do objeto. A) 4 kg C) 1 kg E) 2 kg E) o empuxo tem intensidade igual à metade do peso da água deslocada. B) 16 kg D) 8 kg

Editora Bernoulli 39

Frente B Módulo 12

(UFV-MG-2009) Três vasilhames idênticos contêm um

de um sistema de freio hidráulico. mesmo volume de água. Dentro de cada um há um corpo

em equilíbrio hidrostático, conforme mostra a figura a seguir. Com relação aos módulos dos empuxos E_A , E_B e E_C que a água exerce nos corpos A, B e C, respectivamente, é **CORRETO** afirmar que

Disponível em: (Adaptação). B B B B C C C

Ao pisar no pedal, o motorista ou a motorista exerce F_A uma força sobre o fluido no cilindro a ele ligado, pondo o sistema em funcionamento. Sobre o funcionamento do A) $E_A > E_B$ B) $E_A > E_B > E_C$ C) $E_A = E_B = E_C$ D) $E_A < E_B < E_C$

sistema é **CORRETO** afirmar que B) $E_A < E_B = E_C$ D) $E_A = E_B = E_C$ A) $E_A > E_B > E_C$ C) $E_A = E_B = E_C$

A) o módulo da força exercida sobre o pistão ligado ao

pedal é igual ao módulo da força exercida por qualquer **05.** (CEFET-MG-2010) Um joalheiro é solicitado a verificar se um dos pistões à direita. uma joia é feita de ouro puro, ou se é uma liga de ouro

B) para uma força exercida sobre o pistão ligado ao e prata, como na clássica experiência de Arquimedes.

pedal, entre as forças exercidas pelos pistões da Ao medir o peso desse objeto no ar e depois totalmente

direita, a de maior módulo será exercida pelo de mergulhado em água, obteve-se, respectivamente,

menor área. 2,895 N e 2,745 N. Ele conclui que a joia é _____,

C) para uma força exercida sobre o pistão ligado ao com _____ de massa de ouro.

pedal, entre as forças exercidas pelos pistões da

direita, a de maior módulo será exercida pelo de maior ρ a $1,0 \text{ g/cm}^3$. Considere a densidade da água, da prata e do ouro iguais $1,0 \text{ g/cm}^3$, $10,5 \text{ g/cm}^3$ e $19,3 \text{ g/cm}^3$, respectivamente.

área.

A)
uma
liga;
15,0
g

D) a pressão exercida sobre o pistão pelo pedal é menor

do que a pressão exercida sobre qualquer um dos B) uma liga; 28,0 g

pistões da direita. C) de ouro puro; 43,0 g

E) o trabalho realizado sobre o pistão ligado ao pedal D) de ouro puro; 274,5 g

é muito maior que a soma dos trabalhos realizados

sobre os pistões da direita. E) de ouro puro; 289,5 g

06. (FGV-SP-2010) Quando você coloca um ovo de galinha

03. (UFMG) Ana lança três caixas – I, II e III –, de mesma

dentro de um recipiente contendo água doce, observa massa, dentro de um poço com água. Elas ficam em

que o ovo vai para o fundo, lá permanecendo submerso. equilíbrio nas posições indicadas nesta figura:

Quando, entretanto, você coloca o mesmo ovo dentro do I mesmo recipiente agora contendo água saturada de sal



de cozinha, o ovo flutua parcialmente. Se, a partir dessa última situação, você colocar suavemente, sem agitação,



II água doce sobre a água salgada, evitando que as águas se misturem, o ovo, que antes flutuava parcialmente, ficará completamente submerso, porém, sem tocar o fundo.



III

Água doce

Sejam E_I , E_{II} e E_{III} os módulos dos empuxos sobre, I, II e III, respectivamente, as caixas I, II e III. Com base nessas informações, é **CORRETO** afirmar que

A) $E_I > E_{II} > E_{III}$

B) $E_I < E_{II} = E_{III}$

C) $E_I = E_{II} = E_{III}$ Água salgada

D) $E_I > E_{II} = E_{III}$

40 Coleção Estudo

Teoremas de Pascal e Arquimedes

Com respeito a essa última situação, analise: **09.**
(UFMG) De uma plataforma com um guindaste, faz-se

I. A densidade da água salgada é maior que a do ovo que, descer lentamente e com velocidade constante um bloco

por sua vez, tem densidade menor que a da água doce. cilíndrico de concreto para dentro da água.

II. O empuxo exercido sobre o ovo é uma força que se

igual, em módulo, ao peso do volume de água doce e salgada que o ovo desloca.

III. A pressão atmosférica afeta diretamente o

experimento, de tal forma que, quando a pressão

atmosférica aumenta, mesmo que a água se comporte
Figura I como um fluido ideal, o ovo tende a ficar mais
próximo

do fundo do recipiente.

É **CORRETO** o contido em

A) I, apenas. D) II e III, apenas.

B) II, apenas. E) I, II e III.

C) I e III, apenas.

07. Figura II (UFMG) A figura I mostra uma vasilha, cheia de água até

a borda, sobre uma balança. Nessa situação, a balança Na figura I, está representado o bloco, ainda fora da

registra um peso P_1 . água, em um instante t_1 e, na figura II, o mesmo bloco,

Um objeto de peso P em um instante t posterior, quando já está dentro da água. 2 é colocado nessa vasilha e flutua, 2

ficando parcialmente submerso, como mostra a figura II. Assinale a alternativa cujo gráfico **MELHOR** representa a

Um volume de água igual ao volume da parte submersa tensão no cabo do guindaste em função do tempo.

do objeto cai para fora da vasilha.

A) C)

nsão nsão Te Te



t_1 Tempo t_2 t_1 Tempo t_2

Figura I Figura II B) D)

Com base nessas informações, é **CORRETO** afirmar que, nsão nsão

T_e T_e

na figura II, a leitura da balança é

A) igual a P_1 .

B) igual a $P_{t_1 \text{ Tempo } t_2 t_1 \text{ Tempo } t} + P_{12} \cdot 2$

C) maior que P e menor que $P + P_{112}$ **10.** (UFMG)

Na figura, estão representadas duas esferas,

D) menor que P_{11} I e II, de mesmo raio, feitas de materiais diferentes e

08. (UERJ–2010) Uma pessoa totalmente imersa em uma mantidas nas posições indicadas por meio de fios que imersas em um recipiente contendo água. As esferas são

piscina sustenta, com uma das mãos, uma esfera maciça estão tensionados.

de diâmetro igual a 10 cm, também totalmente imersa.

Observe a ilustração.

Com base nessas informações, é **CORRETO** afirmar que

A massa específica do material da esfera é igual a $5,0 \text{ g/cm}^3$ o empuxo

e a da água da piscina é igual a $1,0 \text{ g/cm}^3$. A razão entre A) é igual à tensão no fio para as duas esferas.

a força que a pessoa aplica na esfera para sustentá-la e B) é maior na esfera de maior massa.

o peso da esfera é igual a C) é maior que o peso na esfera I.

A) 0,2. B) 0,4. C) 0,8. D) 1,0. D) é maior que o peso na esfera II.

Frente B Módulo 12

11. (UFMG) Um barco tem marcados em seu casco os níveis **14.**
(UFMG–2007) Um automóvel move-se em uma estrada

atingidos pela água quando navega com carga máxima no reta e

plana, quando, em certo instante, o motorista

Oceano Atlântico, no Mar Morto e em água doce, conforme pisa fundo no pedal de freio e as rodas param de girar.

a figura. A densidade do Oceano Atlântico é menor que a do O automóvel, então, derrapa até parar. A velocidade

Mar Morto e maior que a da água doce. inicial do automóvel é de 72 km/h e os coeficientes

de atrito estático e cinético entre o pneu e o solo são, respectivamente, 1,0 e 0,8. Despreze a resistência do ar.

I II Considerando essas informações, III

A identificação **CERTA** dos níveis I, II e III, nessa ordem, é 1. **CALCULE** a distância que o automóvel percorre,

A) Oceano Atlântico; água doce; Mar Morto. desde o instante em que o freio é acionado,

B) água doce; Oceano Atlântico; Mar Morto. até parar.

C) água doce; Mar Morto; Oceano Atlântico. Quando se pisa no pedal de freio a fim de se fazer parar

D) Oceano Atlântico; Mar Morto; água doce. um automóvel, vários dispositivos entram em ação e

E) Mar Morto; Oceano Atlântico; água doce. fazem com que uma pastilha seja pressionada contra um

disco metálico preso à roda. O atrito entre essa pastilha

12. e o disco faz com que a roda, depois de certo tempo, (PUC Rio-2008) Uma caixa contendo um tesouro, com

massa total de 100 kg e 0,02 m pare de girar. $\frac{3}{4}$ de volume, foi encontrada

no fundo do mar. Qual deve ser a força aplicada para se Na figura a

seguir, está representado, esquematicamente,

icar a caixa, enquanto dentro da água, mantendo durante um sistema simplificado de freio de um automóvel.

toda a subida a velocidade constante?

Considere a aceleração da gravidade $g = 10 \text{ m/s}^2$ e a Pivô

densidade da água $\rho = 1,0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. Pastilha de freio Óleo de freio

A) 725 N D) 800 N C1 d Roda C2

B) 750 N E) 825 N

C) 775 N 4d

Pistão

13. (UFF-RJ-2008) Dejetos orgânicos depositados no fundo Pistão

da Baía de Guanabara liberam bolhas de gases poluentes Disco de freio Alavanca

quando se decompõem. O diagrama a seguir representa

uma bolha de gás que sobe no interior de um líquido em

duas posições, I e II, ao longo da subida. Pedal de freio

Nesse sistema, o pedal de freio é fixado a uma alavanca,

II que, por sua vez, atua sobre o pistão de um cilindro, C1.

Esse cilindro, cheio de óleo, está conectado a outro

cilindro, C2, por meio de um tubo. A pastilha de freio

mantém-se fixa ao pistão deste último cilindro.

I

Ao se pisar no pedal de freio, o pistão comprime o óleo

Identifique a alternativa que compara **CORRETAMENTE** existente em C1, o que faz com que o pistão de C2 se

as pressões (P) sobre a bolha, os módulos das resultantes mova e pressione a pastilha contra o disco de freio.

das forças que o líquido faz sobre a bolha (E) e os módulos Considere que o raio do cilindro C2 é três vezes maior

das acelerações (A) do movimento da bolha nas duas que o do C1 e que a distância d do pedal de freio ao pivô

posições mostradas. da alavanca corresponde a quatro vezes a distância do

A) $P_{\text{C1}} > P_{\text{C2}}$, $E_{\text{C1}} > E_{\text{C2}}$, $A_{\text{C1}} > A_{\text{C2}}$

B) $P = P$, $E = E$, $A = A$ Com base nessas informações,

C) $P < P$, $E < E$, $A < A$ 2. **DETERMINE** a razão entre a força exercida sobre o

D) $P_{\text{I}} > P_{\text{II}}$, $E_{\text{I}} < E_{\text{II}}$, $A_{\text{I}} < A_{\text{II}}$ pedal de freio e a força com que a pastilha comprime

E) $P_{\text{I}} > P_{\text{II}}$, $E_{\text{I}} < E_{\text{II}}$, $A_{\text{I}} = A_{\text{II}}$ o disco de freio.

42 Coleção Estudo

Teoremas de Pascal e Arquimedes

15. (UFMG) Uma caixa cúbica de isopor, cuja massa é de 10 g,

SEÇÃO ENEM

flutua dentro de um reservatório de óleo. Essa caixa está presa ao fundo do reservatório por um fio, como mostrado **01**. (Enem–2010) Um brinquedo chamado ludião consiste em

na figura I.

um pequeno frasco de vidro, parcialmente preenchido com

Considere que a massa do fio é desprezível e que,

água, que é emborcado (virado com a boca para baixo)

inicialmente, a altura da parte submersa da caixa é

dentro de uma garrafa PET cheia de água e tampada.

muito pequena. Em um certo instante, uma torneira

que abastece o reservatório é aberta. Na figura II, Nessa situação, o frasco fica na parte superior da garrafa,

está representado o gráfico do módulo da tensão T no fio conforme mostra a figura 1.

em função da altura h do nível de óleo.

T (N)

128

h 64



Fio 32



10 20 30 40 50 60



h (cm)



I II



1. Com base nessas informações, **EXPLIQUE** por que



a tensão no fio



A) é nula para o nível de óleo abaixo de 20 cm.



B) aumenta linearmente para o nível de óleo entre **Figura 1**



20 e 40 cm.



C) é constante para o nível de óleo acima de 40 cm. Quando a garrafa é pressionada, o frasco se desloca para

FÍSICA

2. **DETERMINE** o comprimento aproximado da aresta baixo, como mostrado na figura 2.



do cubo. **JUSTIFIQUE** sua resposta.



3. **DETERMINE** a densidade do óleo utilizado.



16. (UFF-RJ) Uma rolha de cortiça, cilíndrica, de massa



$3,14 \times 10^{-3}$ kg, tem raio igual a $1,0 \times 10^{-2}$ m e altura



igual a $5,0 \times 10^{-2}$ m. Essa rolha se encontra presa por um fio, inextensível e de massa desprezível, ao fundo de um recipiente com água, em equilíbrio na vertical, com metade de seu volume imerso, conforme mostra o esquema da figura.

Ao apertar a garrafa, o movimento de descida do frasco



ocorre porque



A) diminui a força para baixo que a água aplica no frasco.

Dados: massa específica da água = $1,0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

B) aumenta a pressão na parte pressionada da garrafa.

aceleração da gravidade = 10 m/s^2

C) aumenta a quantidade de água que fica dentro

A) **REPRESENTE** todas as forças que atuam na rolha e

do frasco.

IDENTIFIQUE seus respectivos agentes causadores.

B) **DETERMINE** a massa específica da cortiça. D) diminui a força de resistência da água sobre o frasco.

C) **CALCULE** a força que a rolha exerce sobre o fio. E) diminui a pressão que a água aplica na base do frasco.

Frente B Módulo 12

02. (Enem–2010) Durante uma obra em um clube, um grupo A respeito das amostras ou do densímetro, pode-se

de trabalhadores teve de remover uma escultura de ferro afirmar que

maciço colocada no fundo de uma piscina vazia. Cinco A) a densidade da bola escura deve ser igual a $0,811 \text{ g/cm}^3$.

trabalhadores amarraram cordas à escultura e tentaram

B) a amostra 1 possui densidade menor do que a puxá-la para cima, sem sucesso.

permit

Se a piscina for preenchida com água, ficará mais fácil

C) a bola clara tem densidade igual à densidade da bola para os trabalhadores removerem a escultura, pois a

escura

A) escultura flutuará. Dessa forma, os homens não

D) a amostra que está dentro do padrão estabelecido é precisarão fazer força para remover a escultura do

a
de
númer
2.

fundo.

B) escultura ficará com peso menor. Dessa forma, E) o sistema poderia ser feito com uma única bola de

densidade entre $0,805 \text{ g/cm}$ e $0,811 \text{ g/cm}^3$.

a intensidade da força necessária para elevar a
escultura será menor.

C) água exercerá uma força na escultura proporcional

GABARITO

a sua massa, e para cima. Esta força se somará à

força que os trabalhadores
fazem para anular a ação
Fixação da força peso da escultura.

D) água exercerá uma força na escultura para baixo, e 01. A 02. C
03. D 04. C 05. B

esta passará a receber uma
força ascendente do piso

Propostos da piscina. Esta força ajudará a anular
a ação da força

peso na escultura. 01. C 04. C 07. A 10. D 13. D

E) água exercerá uma força na escultura proporcional ao 02. C 05. E
08. C 11. B

seu volume, e para cima. Esta força se somará à força 03. C
06. B 09. C 12. D

que os trabalhadores fazem, podendo resultar em 14. 1. d
= 25 m uma força ascendente maior que o peso da
escultura.

03. F 36 c2 2. = (Enem–2009) O controle de qualidade é uma exigência

da sociedade moderna na qual os bens de consumo 15. 1. A) A densidade da caixa é menor que a do

são produzidos em escala industrial. Nesse controle óleo, logo, a caixa flutua, e o fio não

está esticado.

de qualidade, são determinados parâmetros que

permitem checar a qualidade de cada produto. com o aumento da altura da parte B) O fio fica esticado, e o empuxo cresce

O álcool combustível é um produto de amplo consumo submersa.

muito adulterado, pois recebe adição de outros $E = \rho_o A \cdot (h - h_o)g$; $h_o = 20 \text{ cm}$

materiais para aumentar a margem de lucro de $\Rightarrow E = P + T \Rightarrow T = E - P$

quem o comercializa. De acordo com a Agência Como o peso é constante, T aumenta

Nacional de Petróleo (ANP), o álcool combustível linearmente para o aumento do nível de

deve ter densidade entre 0,805 g/cm³ óleo entre 20 e 40 cm. 3 e 0,811 g/cm³ .

Em algumas bombas de combustível, a densidade do C) O fio está esticado e a caixa está

totalmente submersa, logo, o empuxo

álcool pode ser verificada por meio de um densímetro

não varia mais e, conseqüentemente,

similar ao desenhado a seguir, que consiste em a tensão é constante.

duas bolas com valores de densidade diferentes e 2. 20 cm, pois é o

intervalo de comprimento em

verifica quando o álcool está fora da faixa permitida. que o empuxo varia.

Na imagem, são apresentadas situações distintas para 3. $d_{\text{óleo}} = 8,0 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$

três amostras de álcool combustível. 16. A)

E Empuxo (água)

Tração (fio)

Peso (Terra)

$$\text{B) } \rho = 2,0 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{C) } F = 4,7 \times 10^{-2} \text{ N}$$

Seção Enem

01. C 02. E 03. D

Amostra 1 Amostra 2 Amostra 3

44 Coleção Estudo FÍSICA MÓDULO FRENTE Ondas estacionárias 11 C

Quando um pulso ou uma onda se propaga através de uma e em fase com ele, a amplitude de oscilação do balanço pode

corda, por exemplo, a energia é transmitida através dessa ser alterada significativamente. Caso a energia fornecida

corda. Nesse caso, dizemos que a onda é **progressiva**, ao balanço seja igual à energia transferida por ele ao meio

ou seja, a energia progride ao longo da corda. A figura a circundante, a amplitude de oscilação do balanço permanece

seguir mostra, em cinco instantes diferentes, uma onda que sempre a mesma. Entretanto, se a energia que o agente

se desloca entre os pontos A e B de uma corda elástica. externo fornece ao balanço é maior que a energia que o

Observe que a onda e a energia transmitida por ela se sistema transfere ao meio, a amplitude de oscilação do

deslocam de uma extremidade à outra da corda. Veja ainda balanço aumenta gradativamente. Nesses casos, dizemos

que a primeira metade da onda, que possui uma crista, que o sistema entra em **ressonância** com o agente externo.

se desloca de A para B sempre na parte superior da figura. Todo corpo material apresenta uma ou mais frequências

Ou seja, enquanto a onda se propaga de A para B, a parte naturais de vibração. Se um corpo recebe

energia de um

da onda que caminha na frente será sempre uma crista. agente externo, numa das suas frequências naturais,

ele começa a ressonar, e isso pode levar o sistema a

A B exemplos que ilustram essa situação. Um recipiente de vidro oscilar eternamente ou a entrar em colapso. Muitos são os



pode estourar se uma onda sonora, com frequência igual

a uma das frequências naturais de vibração das moléculas

A B

do vidro, incidir sobre o recipiente. Um cálculo renal, por exemplo, pode ser desintegrado pela incidência de

A onda ultrassônica de frequência apropriada. B

A B ONDAS ESTACIONÁRIAS EM

A CORDAS B

Considere, agora, uma corda fixa nas extremidades e
que um oscilador produza uma série de pulsos
sucessivos,

Quando encontra a extremidade B, fixa, a onda é de
determinada frequência. Os pulsos vão propagar
através

refletida com inversão de fase. Assim, a primeira
metade da corda, e cada um deles será refletido nas
extremidades

da onda volta, após a reflexão, contendo um vale que
vai fixas desta. Nessas extremidades, a corda não pode
oscilar

se superpor à segunda metade da onda (que apresenta
um e tais pontos ficarão, portanto, em repouso.
Dependendo

vale), produzindo uma interferência construtiva. Após
essa do valor da frequência imposta pelo oscilador,
pode

interferência, a segunda metade da onda sofre reflexão e acontecer um padrão de interferência na corda, de modo

volta contendo uma crista. A onda, assim, caminha para que determinados pontos desta fiquem em permanente

a esquerda, de forma ainda progressiva, com os mesmos repouso, devido a uma constante interferência destrutiva,

valores de velocidade, frequência e comprimento de onda. e outros pontos vibrem transversalmente, com amplitude

Agora a parte da onda que caminha na frente é sempre um máxima, em decorrência de uma permanente interferência

vale. Numa situação real, à medida que a onda propaga, construtiva. Quando tal padrão é obtido, a onda formada

Ou seja, uma parte da energia da onda vai sendo transferida percebemos a onda propagar, ou seja, a energia deixa de progredir através da corda e fica aprisionada entre os pontos para o meio circundante. a sua amplitude vai diminuindo com o passar do tempo. é chamada de **onda estacionária**. Nesse caso, não mais

de constante interferência destrutiva – chamados **nós**
(N)

O mesmo acontece com um pêndulo que, posto em

da onda estacionária. Os pontos da corda de maior amplitude

oscilação, tem a sua amplitude de oscilação reduzida de vibração transversal são chamados de **ventres (V)**

gradativamente até parar por completo. Isso ocorre porque da onda estacionária. Esse padrão de interferência

o sistema transfere energia para o meio que o cerca. Se um ocorre para diversas frequências. As diversas situações

agente externo fornece energia ao pêndulo, de maneira e nas quais se produz uma onda estacionária na corda são

frequência convenientes, ele pode manter a sua oscilação conhecidas como **harmônicos** ou **modos de vibração** da

eternamente, como acontece com um relógio de pêndulo. corda. Nessas situações, a corda entra em ressonância com

Você, provavelmente, já deve ter se divertido em um balanço o oscilador. Assim, os pontos da corda correspondentes aos

de cordas. Se uma pessoa empurra o balanço, fornecendo-lhe ventres vibram com a maior amplitude possível (para aquela

energia com a mesma frequência de oscilação do sistema energia que o agente externo fornece).

Frente C Módulo 11

A menor frequência, e, portanto, o maior comprimento

ONDAS

ESTACIONÁRIAS EM

de onda, que permite a formação de uma onda estacionária

é chamada de 1º harmônico da onda ou de frequência

TUBOS SONOROS fundamental. A figura a seguir mostra o 1º harmônico

obtido numa corda elástica, de comprimento L , presa nas

extremidades e posta a oscilar com frequência f .

Quando **TUBO FECHADO** um padrão semelhante ao mostrado na figura é obtido,

percebemos a corda vibrar como um todo, nesse caso, para

cima e para baixo, e não vemos a onda deslocar-se através Considere um tubo, de comprimento L , fechado em uma

da corda. Observe que a distância entre os dois nós é igual extremidade e aberto na outra, preenchido com ar ou outro

a meio comprimento de onda (gás qualquer. Um tubo com tais características é chamado $\lambda / 2$).

v de **tubo fechado**. As partículas de ar em seu interior vibram

N N 1º harmônico ou de maneira aleatória, devido à agitação térmica, conforme

f visto no estudo de gases. Imagine que um alto-falante, 1 harmônico fundamental

por exemplo, seja colocado em vibração, com frequência f,

na extremidade aberta do tubo, como mostra a figura a seguir.

$$L = \lambda / 2 \Rightarrow \lambda = 2L$$

Usando a equação das ondas, a frequência fundamental

(f) pode ser calculada por: f_1



$$f = v/\lambda = v/2L \Rightarrow f_1$$

Sendo v o módulo da velocidade das ondas incidentes e refletidas

A vibração do alto-falante produz compressões e nas extremidades da corda.

rarefações do ar no interior do tubo, de forma que uma onda

imposta à corda também aumenta. Como já dito, existem comprimento de onda λ e frequência f . Essa onda é diversos padrões de ondas estacionárias – chamados refletida pela extremidade fechada do tubo e volta com Se a frequência do oscilador aumenta, a frequência longitudinal se propaga para a direita com velocidade v ,

múltiplas da frequência fundamental. Em todas essas os mesmos valores de frequência e comprimento de onda harmônicos – nos quais a corda vibra com frequências

situações, a distância entre dois nós consecutivos (ou duas e com velocidade de mesmo módulo. Assim, haverá uma

cristas adjacentes) é igual a meio comprimento de onda superposição das ondas incidente e refletida. Dependendo da

(frequência das ondas produzidas pelo oscilador, um padrão $\lambda / 2$). As figuras a seguir mostram o 2º e o 3º harmônicos.

Observe que os pontos da corda onde estão os ventres de interferência poderá ser obtido e se produzirá, dentro do

oscilam, alternadamente, para baixo e para cima. tubo, uma **onda estacionária**. Ou seja, o ar dentro do tubo

V entra em ressonância com o alto-falante. Os harmônicos V

N dessa onda exigem que na extremidade fechada exista um N N 2º harmônico f_2 **nó** (as moléculas em contato com a lateral direita do tubo

$L = 2(\lambda$ não podem oscilar) e que na extremidade aberta exista um $\lambda/2$) $\Rightarrow \lambda$

$$\lambda_2 = L$$

L **ventre** (as moléculas vibram livremente para dentro e para

V V V em um tubo podem ser comparadas àquelas que se formam fora do tubo com amplitude máxima). As ondas estacionárias

N N N N 3º harmônico f em uma corda vibrante. Para essa analogia, veja a figura 3

a seguir. Observe que, nos ventres, as moléculas têm a

$$L = 3(\lambda \text{ máxima amplitude de vibração (região de rarefação) e, } \lambda_3 / 2) \Rightarrow \lambda_3 = 2L/3$$

L nos nós, elas não apresentam vibração perceptível (região

As frequências dos harmônicos mostrados são: de compressão). Se um pouco de serragem de madeira,

$f = v/\lambda = v/L$ $f = 2(v/2L)$ $f = 2f_1$ $\lambda_2 \Rightarrow f_2 \Rightarrow \lambda_2 \Rightarrow f_2$ antes de nele se estabelecer a onda estacionária, esse por exemplo, for colocado em toda a extensão do tubo,

$f = v/\lambda = v/(2L/3)$ $\lambda = 3(v/2L)$ $\Rightarrow f_3 \Rightarrow \lambda_3 \Rightarrow f_3$ $f = 3f_1$ material ficará depositado nas regiões do tubo onde se

Usando o mesmo raciocínio para outros harmônicos, formam os nós da onda, conforme mostrado a seguir.

é possível provar que a corda é capaz de vibrar, de forma V V V V

estacionária, com diversas frequências,

correspondentes N, N, N, N a vários harmônicos distintos. Os valores das frequências desses harmônicos devem ser, sempre, múltiplos inteiros da frequência fundamental. Assim, a frequência de qualquer

dos harmônicos pode ser determinada por:

N, N, N, N



$$f = N \cdot f_1, \text{ em que } N = 1, 2, 3, \dots, N_1$$



Na equação anterior, N representa o número do harmônico V, V, V, V



correspondente e, claro, a quantidade de ventres presentes

Serragem de madeira

na onda estacionária.

Alguns dos harmônicos que podem ser estabelecidos
 As frequências f dos harmônicos estacionários no tubo

em um tubo fechado estão mostrados a seguir. Uma vez aberto são:

que a distância entre dois nós (ou ventres) consecutivos $v = \lambda \cdot f \Rightarrow f = v/\lambda$, v = velocidade da onda no gás é igual a meio comprimento de onda, a distância entre

um nó e um ventre, adjacentes, é igual a um quarto

do comprimento de onda (D 1º harmônico: $f = v/4$).₁ = $v/2L$; _{NV} λ

V N 2º harmônico: $f = v/L = 2(v/2L)$ $f = 2f_1 \Rightarrow$; ₂₁ 1º harmônico

f_1 3º harmônico: $f = v/(2L/3) = 3(v/2L) = 3f_1 \Rightarrow f_{31}$

$$L = \lambda/4 \Rightarrow \lambda = 4L$$

Assim, a frequência de qualquer dos harmônicos será:

$$v \quad N \quad v \quad N$$

3º harmônico

$$f_{f_{3N}} = N \cdot f, \text{ em que } N = 1, 2, 3, \dots$$

$$L = 3(\lambda/4) = 4L/3 \Rightarrow \lambda_3$$

EXERCÍCIOS DE
 FIXAÇÃO

f5 **01.** (UFU-MG) Uma corda de um violão emite uma frequência

$L = 5(\lambda/4) \Rightarrow \lambda = 4L/5$ fundamental de 440,0 Hz ao vibrar livremente, quando

L tocada na região da boca, como mostra a figura 1.

As frequências f dos harmônicos estacionários no tubo Pressiona-se então a corda, a $L/3$ de distância da pestana,

fechado podem ser calculadas pela equação das ondas: como mostra a figura 2.

$v = \lambda \cdot f \Rightarrow f = v/\lambda$, v = velocidade da onda no gás



1º harmônico: $f_1 = v/4L$;

3º harmônico: $f = v/(4L/3) = 3(v/4L) f ; \Rightarrow = 3f_{31}$

5º harmônico: $f = v/(4L/5) = 5(v/4L) \Rightarrow f = 5f_{51}$

O fato de sempre existir um nó na extremidade

FÍSICA

fechada e um ventre na extremidade aberta limita o A frequência fundamental emitida pela corda pressionada,

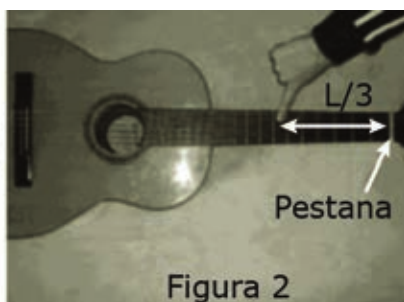
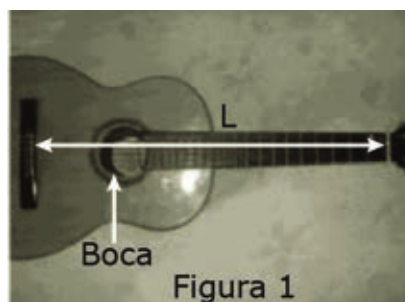
número de possíveis harmônicos da onda estacionária quando tocada na região da boca, será de

inteiros da frequência fundamental. Assim, a frequência B) 146,6 Hz. de qualquer dos harmônicos será: C) 880,0 Hz. no tubo fechado a valores que sejam múltiplos ímpares A) 660,0 Hz.

$$f = N \cdot f_N, \text{ em que } N = 1, 3, 5, \dots \text{ D) } 293,3 \text{ Hz.}_1$$

TUBO ABERTO 02. (UFSCar-SP) A figura representa uma configuração de

ondas estacionárias numa corda.



Um tubo é chamado de **aberto** se possui as duas N N

extremidades opostas abertas. Dessa forma, os harmônicos A B das ondas estacionárias que se estabelecem nesses tubos v v v devem ter ventres nesses dois extremos. A figura a seguir

mostra alguns harmônicos que se formam no tubo aberto. A extremidade A está presa a um oscilador que vibra com

Quando tais harmônicos são obtidos, o ar no interior pequena amplitude. A extremidade B é fixa e a tração

do tubo entra em ressonância com o agente externo na corda é constante. Na situação da figura, em que

que está produzindo a vibração. aparecem três ventres (V) e quatro nós (N), a frequência

V N V 1º harmônico frequência do oscilador, observa-se que essa configuração do oscilador é 360 Hz. Aumentando-se gradativamente a

f se desfaz até aparecer, em seguida, uma nova configuração 1 ou fundamental

de ondas estacionárias, formada por

$L = \lambda / 2 \Rightarrow \lambda = 2L$ A) quatro nós e quatro ventres, quando a frequência

V N V N V atingir 400 Hz.

2º harmônico B) quatro nós e cinco ventres, quando a frequência

f_2 atingir 440 Hz.

$L = 2(\lambda / 2)$ C) cinco nós e quatro ventres, quando a frequência $f_2 \Rightarrow \lambda = L / 2$

V atingir 480 Hz. N V N V N V

3º harmônico D) cinco nós e cinco ventres, quando a frequência

f atingir 540 Hz. ₃

$L L = 3(E)$ seis nós e oito ventres, quando a frequência $\lambda_3 / 2) \Rightarrow \lambda_3$
 $= 2L/3$

atingir 720 Hz.

Editora Bernoulli 47

Frente C Módulo 11

03. (PUC-Campinas-SP) Uma proveta graduada tem 40,0 cm Sobre este fenômeno, é **CORRETO** afirmar que

de altura e está com água no nível de 10,0 cm de altura. A) não há relação alguma entre as frequências da fonte

Um diapasão de frequência 855 Hz vibrando próximo oscilante e a frequência natural do corpo, que possa

à extremidade aberta da proveta indica ressonância. ocasionar o colapso.

Uma onda sonora estacionária possível é representada na

B) é devido à superposição de ondas que a frequência

figura a seguir. A velocidade do som, nessas condições, é,

da fonte oscilante pode atingir a frequência natural

em m/s,

do corpo, e este entrar em colapso.

40

C) é devido à interferência das ondas que a frequência

da fonte oscilante pode atingir a frequência natural

do corpo, e este entrar em colapso.

D) quando a fonte oscilante tem frequência igual
10 à frequência natural do corpo, este entra

em
ressonância

E) o colapso acontece devido ao efeito Doppler.

A) 326. D) 350.

B) 334. E) 358. **EXERCÍCIOS PROPOSTOS**
C) 342.

04. (PUC-SP) Temos dois tubos sonoros, A e B, cheios de ar.

01. (Cesesp-PE) Em uma corda de 7,5 cm de comprimento,
A é aberto e B, fechado, ambos com comprimento de
fixa em ambas as extremidades, são produzidas ondas
85 cm. Quais as frequências fundamentais, em Hz,
cujos comprimentos de onda, correspondentes ao
em A e B, respectivamente, se a velocidade do som no ar
é de 340 m/s? modo fundamental e aos dois harmônicos seguintes,

são,
em
cm,

A) 100 e 200

A)
7,5;
5;

3,5.

B) 100 e 400

B)
15;
7,5;
5.

C) 200 e 100

C)
7,5;
3,5;
5.

D) 300 e 400

D)
5;
7,5;
15.

E) 400 e 300

E)
3,5;
5;
15.

05. (UEPB–2010) *Todo corpo capaz de vibrar ou oscilar tem*

frequência natural de oscilação, quer seja ele uma lâmina **02.** (UFC – 2010) *Um motor produz pequenas*

de aço, um copo de vidro, um automóvel, quer seja uma

vibrações transversais, com frequência de 10 Hz, ponte. Se uma fonte oscilante tiver a mesma frequência

em uma corda homogênea de 2,0 m de comprimento que a frequência natural de um corpo, este pode atingir

e densidade linear $0,05 \text{ kg/m}$. Uma das extremidades

o colapso. Foi o que aconteceu com a ponte de Tacoma

da corda é mantida fixa em uma parede, enquanto
em 1940 nos Estados Unidos, levando-a quebrar-se,

a outra está ligada ao motor. Sabendo-se que,
conforme ilustrado a seguir.

com esta frequência, a corda está no segundo

GASPAR, A. *Experiências de Ciências para*

o Ensino Fundamental. São Paulo: Ática, 2005. harmônico, determine o
valor da tensão na corda e,

em seguida, assinale a alternativa que apresenta



CORRETAMENTE esse valor.

A)

10

N

B)

20

N

C)

200

N

48 Coleção Estudo

Ondas estacionárias

03. (UFG–2010) Um violão possui seis cordas de mesmo **06.**
(PUCPR) Uma corda de 1,0 m de comprimento está fixa em

comprimento L , porém, de massas diferentes. suas extremidades e vibra na configuração estacionária

A velocidade de propagação de uma onda transversal conforme a figura a seguir. Conhecida a frequência

em uma corda é dada por T de vibração igual a 1 000 Hz, podemos afirmar que $v =$, onde T é a tensão na velocidade da onda na corda é μ

corda e μ , sua densidade linear de massa. A corda vibra no modo fundamental, no qual o comprimento L corresponde a meio comprimento de onda λ . A frequência de vibração de uma corda do violão aumentará se 1,0 m

A) μ aumentar. A) 500 m/s.

B) v diminuir. B) 1 000 m/s.

C) L diminuir. C) 250 m/s.

D) D) 100 m/s. λ aumentar.

E) T diminuir. E) 200 m/s.

04. 07. (PUC Rio) Uma corda de guitarra é esticada do ponto A (UFVJM-MG-2009) Observe esta figura.

ao ponto G da figura. São marcados os pontos A, B, C, D, E, F, G em intervalos iguais. Nos pontos D, E e F, são apoiados pedacinhos de papel. A corda é segurada com Vibrador um dedo em C, puxada em B e solta. O que acontece?

Ela representa uma corda de 125 cm de comprimento,

com uma ponta conectada a um anel sem peso que **FÍSICA**

pode deslizar ao longo da haste sem atrito. A outra

ponta está ligada à extremidade de um vibrador. A B C D E F G
Quando a frequência do vibrador é ajustada para 60 Hz,

a corda vibra no padrão de onda estacionária. A) Todos os papéis vibram.

Com base nesses dados, assinale a alternativa que B) Nenhum papel vibra.

contém os valores **CORRETOS** para a velocidade

C) O papel em E vibra.

de propagação e o comprimento de onda das ondas

D) Os papéis em D e F vibram.

componentes, respectivamente.

E) Os papéis em E e F vibram.

A) 75 m/s e 1,25 m

B) 75 m/s e 1,00 m **08.** (UEPB–2009) Certo músico que tinha conhecimentos em

física acústica decidiu construir um instrumento musical e,

C) 60 m/s e 1,00 m

durante essa construção, medir a frequência fundamental

D) 60 m/s e 1,25 m do som emitido pela corda deste instrumento. Utilizando-se

de uma corda que tem massa igual a 50 gramas,

05. (UFMG) Uma corda esticada produz um som de frequência prendeu-a horizontalmente entre dois pontos distantes

fundamental 1 000 hertz. Para que a mesma corda de 50 cm, e, aplicando uma força de tensão igual a 10 N

produza um som de frequência fundamental 2 000 hertz, à corda, esta vibrou e transmitiu vibrações aos pontos,

a tensão da corda deve ser formando ondas estacionárias. Pode-se dizer que a

frequência fundamental do som emitido, em Hz, vale

A) quadruplicada.

A)
10.

B) dobrada. $1/2$ B) 10.

C) multiplicada por $1/2$. C) $10^{-1/2}$.

D) reduzida à metade. D) 1.

E) reduzida a um quarto. E) 10^2 .

Frente C Módulo 11

09. (PUC RS) Um tubo sonoro ressoa com mais intensidade na **12.**
(PUC Minas) Um tubo sonoro está no ar ($v_{\text{som}} = 320 \text{ m/s}$)

frequência de 680 hertz. Com experimentação apropriada, e emite um som fundamental de frequência 80 Hz.

percebe-se a formação, no interior do tubo, de uma Os dois harmônicos seguintes são emitidos com

sucessão de nós e ventres. Sabendo-se que a velocidade frequências respectivamente iguais a 240 Hz e 400 Hz.

de propagação do som é de 340 m/s, conclui-se que a Leia atentamente as afirmativas a seguir.

distância entre dois nós consecutivos é de ____ cm.

I. O tubo é certamente fechado em uma das

A) 15 extremidades.

B) 20 II. O tubo só emite harmônicos de ordem ímpar.

C) 25 III. O tubo possui 1,0 m de comprimento.

D) 30

Assinale

E) 40

A) se todas as afirmativas estiverem corretas.

10. B) se todas as afirmativas estiverem incorretas. (PUC-SP) São dados dois tubos sonoros, de mesmo

comprimento C) se apenas as afirmativas I e II estiverem corretas. ☐
, sendo um deles (A) aberto e outro (B)

fechado numa das extremidades. O comprimento de onda D) se apenas as afirmativas I e III estiverem corretas.

do som fundamental do primeiro tubo, A, é λ . Então, A E) se apenas as afirmativas II e III estiverem corretas.

o comprimento de onda λ do som fundamental emitido B

pelo tubo B será **13.** (VUNESP) Dados os tubos acústicos da figura, assinale

A) $(1/4)$ a ordem **CORRETA** das frequências fundamentais que λ_A .

eles
emitem.

B) $(1/2)\lambda_A$.

C) λ_A .

E) $4L$ D) $2\lambda_A$.

3

11. (FEPECS-DF-2008) Em linguagem musical, intervalo (i)

entre duas notas de frequências f e f' é a razão entre 1 2 3 4

a maior e a menor frequência, ou seja, $i = f'/f$, sendo

$f < f'$. O intervalo é denominado uníssono quando $i = 1$, A) $f_4 > f_3 > f_2 > f_1$ D) $f_1 > f_3 > f_2 > f_4$

tom maior quando $i = 9/8$, tom menor quando $i = 10/9$, B) $f_1 > f_2 > f_3 > f_4$ E) $f_2 > f_3 > f_1 > f_4$

semitom quando $i = 16/15$, e oitava quando $i = 2$.

C)
 f_4
>
 f_2
>
 f_3

Considere dois tubos acústicos de mesmo comprimento L ,
sendo um aberto em ambas as extremidades e o
outro **14.** (UNIFESP) Se você colocar a sua mão em forma de
concha

fechado em uma das extremidades. O primeiro está

junto a um de seus ouvidos, é provável que você ouça
vibrando numa frequência quatro vezes maior que sua

um leve ruído. É um ruído semelhante ao que se ouve
fundamental, enquanto o segundo, numa frequência nove
quando se coloca junto ao ouvido qualquer objeto que
vezes maior que sua fundamental.

tenha uma cavidade, como uma concha do mar ou um
canudo. A fonte sonora que dá origem a esse ruído

A) é o próprio ruído do ambiente, e a frequência do som
depende do material de que é feita a cavidade.

L

B) são as partículas do ar chocando-se com as paredes
no interior da cavidade, e a frequência do som
depende da abertura dessa cavidade.

Tubo C) é o próprio ruído do ambiente, e a frequência do som Tubo
aberto fechado depende da área da abertura dessa
cavidade.

O intervalo entre os sons emitidos pelos dois tubos é D) são as partículas do ar chocando-se com as paredes

no interior da cavidade, e a frequência do som

A) uníssono. D) semitom.

depende da forma geométrica da cavidade.

B) tom maior. E) oitava.

E) é o próprio ruído do ambiente, e a frequência do som

C) tom menor. depende da forma geométrica da cavidade.

50 Coleção Estudo

Ondas estacionárias

15. (PUC-Campinas-SP) Uma corda elástica está ligada **18.** (UFC)
Considere o arranjo mostrado na figura

a um vibrador e nela se estabelece uma propagação a seguir, onde vemos um tubo sonoro T, ao qual está

ondulatória. As figuras 1, 2 e 3 representam essa a j u s t a d o o ê m b o l o E , q u e p o d e s e r m o v i d o

propagação ondulatória em três situações diferentes.
convenientemente, e uma fonte F, que emite som de

Pode-se afirmar **CORRETAMENTE** que frequência constante f.

T

F

Figura 1

L

Figura 2

Utilizando esse arranjo, um estudante verificou que deslocando o êmbolo para a direita, desde a posição em que L é igual a zero, a primeira ressonância ocorreu na Figura 3 posição em que $L = L_1 = 18 \text{ cm}$. Supondo que o estudante continue a deslocar o êmbolo para a direita, em qual

A) a corda tem as duas extremidades fixas somente

na situação da figura 1. valor subsequente L_2 , em centímetros, ocorrerá uma

nova ressonância?

B) o comprimento de onda é o mesmo nas três situações.

C) o maior período ocorre na situação representada **19.** (U F U - M G) E m u m a e x p e r i ê n c i a p a r a m e d i r

na figura 3. a velocidade do som no ar, utilizou-se um tubo contendo água, aberto em uma extremidade,

D) nas três situações a corda está em ressonância com

e um gerador de áudio com um alto-falante que

o vibrador.

gerava uma onda de 250 Hz. Observou-se que ocorria

E) a velocidade de propagação na situação da figura 3 ressonância quando a coluna de ar era de 96 cm e que,

é o triplo daquela da figura 1. abaixando o nível da água, a próxima
ressonância

FÍSICA

ocorria quando a profundidade da coluna de ar era de

16. (UFRGS) Duas cordas de violão foram afinadas de 160 cm. Considerando os dados anteriores, **ENCONTRE** a

modo a emitirem a mesma nota musical. Golpeando-se velocidade do som nesta região.

uma delas, observa-se que a outra também oscila, embora com menor intensidade. Esse fenômeno é conhecido por Alto-falante

A) batimentos. D) ressonância.

B) interferência. E) amortecimento.

Ar 96 cm

C) polarização.

17. (Unimontes-MG–2009) O som de determinada frequência,

emitido por uma trombeta, é capaz de quebrar uma Água taça de vidro (veja a figura). A taça, antes de quebrar, oscila na mesma frequência do som emitido pelo

Figura a

instrumento musical.



Alto-falante

Ar

160 cm

O fenômeno físico relacionado a esse evento é conhecido por Água

- A) interferência. C) difração.
B) Figura b ressonância. D) refração.

Editora Bernoulli 51

Frente C Módulo 11

SEÇÃO ENEM

01. (Enem–2009) Um dos modelos usados na caracterização dos sons ouvidos pelo ser humano baseia-se na hipótese de que ele funciona como um tubo ressonante. Neste caso, os sons externos produzem uma variação de pressão do ar no interior do canal auditivo, fazendo a membrana (tímpano) vibrar. Esse modelo pressupõe que o sistema funciona de forma equivalente à propagação de ondas Divulgação sonoras em tubos com uma das extremidades fechadas *Ponte de Tacoma vibrando no modo torsional.*

pelo tímpano. As frequências que apresentam ressonância Um estádio de futebol deve ser construído levando em

com o canal auditivo têm sua intensidade reforçada, conta a “vibração” das torcidas. Se todo mundo começasse

enquanto outras podem ter sua intensidade atenuada. a pular e bater os pés, poderia surgir uma ressonância com

as arquibancadas e aconteceria uma tragédia.

Tímpano





Uma grande estrutura de engenharia civil atual,
como o estádio de futebol, por exemplo,

Canal auditivo Canal auditivo é projetada de modo que
as diversas partes que a compõe apresentem frequências
de ressonância diferentes

externo entre si. Dessa forma, o estádio não será destruído por

ressonân
porque

Considere que, no caso de ressonância, ocorra um nó A) as diversas
partes, ao entrarem em ressonância com

sobre o tímpano e ocorra um ventre da onda na saída a vibração da
torcida, vibram em sentidos opostos.

do canal auditivo, de comprimento L igual a 3,4 cm. Dessa forma, as
amplitudes de oscilação das partes

Assumindo que a velocidade do som no ar (v) é igual a vizinhas se
anulam.

340 m/s, a frequência do primeiro harmônico (frequência B)
nenhuma das partes da estrutura entra em

fundamental, $n = 1$) que se formaria no canal, ou seja, ressonância
com a vibração da torcida. Dessa forma,

a frequência mais baixa que seria reforçada por uma toda a

estrutura permanece em repouso e sem

ressonância no canal auditivo, usando este modelo, é nenhuma vibração.

A) 0,025 kHz, valor que considera a frequência do C) as partes que entram em ressonância aumentam a

primeiro harmônico como igual a $\nu v/4L$ e equipara amplitude de vibração. Entretanto, elas transmitem

o ouvido a um tubo com ambas as extremidades a vibração às partes vizinhas, que entram em

abertas. ressonância com aquelas, dividindo assim energia

B) 2,5 kHz, valor que considera a frequência do primeiro absorvida.

harmônico como igual a $\nu v/4L$ e equipara o ouvido a D) apenas as partes que entram em ressonância têm a

um tubo com uma extremidade fechada. amplitude de vibração aumentada. Isso faz com elas

C) 10 kHz, valor que considera a frequência do primeiro induzam uma onda eletromagnética que percorre toda

harmônico como igual a $\nu v/L$ e equipara o ouvido a a obra, estabilizando a estrutura. um tubo com ambas as extremidades fechadas. E) apenas as partes que apresentam frequência de

D) 2 500 kHz, valor que expressa a frequência do vibração semelhante àquela imposta pela torcida entram em ressonância. Assim, o aumento de primeiro harmônico como igual a $\nu v/L$, aplicável ao amplitude é pequeno e restrito, praticamente, a elas. ouvido humano.

E) 10 000 kHz, valor que expressa a frequência do

primeiro harmônico como

igual a $\nu v/L$, aplicável ao GABARITO ouvido e ao tubo aberto e fechado.

02. Uma ponte nos Estados Unidos desabou quando entrou

Fixação

em ressonância com o vento. A ponte sobre o Estreito

01. A 02. C 03. C 04. C 05. D

de Tacoma, logo após ser liberada ao tráfego, começou

a balançar sempre que o vento soprava um pouco mais

Propostos

forte. No dia 7 de novembro de 1940, aconteceu a

ressonância. Inicialmente, a ponte começou a vibrar em 01. B 05. A
09. C 13. C 17. B

modos longitudinais, mas logo apareceram os chamados 02. B 06. A
10. D 14. E 18. 54 cm

“modos torsionais”, nos quais a ponte balançava para os

03. C 07. D 11. B 15. D 19. 320 m/s

lados, se torcendo toda. Na ressonância, a amplitude

desses modos torsionais aumentou de tal forma que a 04. C 08. A
12. A 16. D

ponte desabou. Para que ocorra uma ressonância desse

Enem

Seção

tipo é necessário que o vento forneça energia à ponte

com frequência próxima a uma das frequências naturais 01. B 02. E

de vibração da estrutura.

52 Coleção Estudo

FÍSICA MÓDULO FRENTE Som e efeito Doppler 12 C

ONDAS SONORAS faixa de sons audíveis, principalmente nas altas frequências. Isso se deve, segundo eles, à enorme poluição sonora a que

ela provoca um distúrbio vibratório que se propaga através usam esses sons para mapear o espaço à sua volta. A figura das moléculas de ar de forma semelhante à onda que se a seguir mostra a faixa audível (som) para alguns animais. propaga em uma mola que vibra longitudinalmente. Quando O eixo das frequências não está em escala. Quando, por exemplo, uma lâmina é posta em vibração, sons abaixo e acima dos valores citados. Muitos deles, inclusive, a população urbana está submetida. Certos animais escutam

essa vibração atinge o tímpano, ela é transmitida pelo sistema

auditivo até o cérebro. Se a frequência de vibração da lâmina Golfinho estiver dentro da faixa de audição humana, a pessoa que Cão recebeu essa vibração escutará o som produzido pela lâmina. Morcego Ou seja, sempre que uma onda sonora é produzida, um corpo Homem está em vibração de modo a gerar aquele som. Veja a seguir.

15 20 150 1 000 20 000 50 000 120 000 150 000 f (Hz)



Compressões e rarefações Para qualquer um dos animais citados, as ondas sonoras

se propagando no ar com frequências abaixo e acima da sua faixa audível (som)

.....
correspondem ao infrassom e ao ultrassom,
respectivamente.

..... Durante a
passagem da onda sonora, as partículas do meio
.....

..... transmitem
a energia para as suas vizinhas imediatas, que
.....

..... o fazem
para as outras partículas adjacentes, e assim por
.....

..... diante.
Dessa forma, quanto mais rapidamente as partículas

f f transferem a energia umas às outras, mais

instrumentos musicais de corda e de sopro, respectivamente, As cordas vibrantes e os tubos sonoros são muito usados em a onda sonora propaga através do meio. Assim, fica claro que a onda sonora não pode se propagar no vácuo. A velocidade da onda sonora, em determinado meio, depende para produção de ondas sonoras. Quando as cordas e os tubos de vários fatores, entre eles a elasticidade, a densidade, entram em ressonância com o agente externo, os elementos a rigidez, o grau de organização das partículas e a vibrantes oscilam com a máxima amplitude para aquele valor temperatura do meio. A tabela a seguir mostra a velocidade, de energia fornecido pelo executor do instrumento, e o som aproximada, da onda sonora em algumas substâncias. produzido é bem perceptível.

A onda sonora é uma onda mecânica, longitudinal,
Velocidade da onda sonora (m/s)

que necessita de um meio material para se propagar.

As partículas que compõem o meio oscilam durante a
Borracha Ar (20 °C) Ar (40 °C) Água Aço passagem dessa onda.
Assim, o meio de propagação

apresenta, em certo instante, regiões nas quais a
densidade 60 340 352 1 450 5 100

de partículas é maior e outras regiões em que a
densidade

Um fato muito importante deve ser destacado no que

de partículas é menor. Ou seja, o meio apresenta regiões

entre duas regiões adjacentes de maior pressão (ou de ultrassom) e da sua frequência, se propagam num certo menor pressão) corresponde ao comprimento de onda (λ) meio com a mesma velocidade. da onda sonora. Dessa forma, medindo-se a pressão nos

Observe a tabela anterior. Veja que a velocidade do som de maior e de menor pressão, respectivamente. A distância sonoras, independentemente do tipo (som, infrassom ou diz respeito à velocidade da onda sonora: todas as ondas

diversos pontos do meio, conseguimos determinar o seu

comprimento de onda. no ar aumenta com a temperatura. É fácil perceber o motivo.

Quanto maior a temperatura, maior a agitação térmica das

O espectro das ondas sonoras, para um determinado moléculas, e, dessa forma, elas transmitem a energia umas

observador, é composto de três tipos de ondas: o infrassom, às outras mais rapidamente. o som e o ultrassom. O som, para o homem, corresponde às



ondas sonoras com frequências compreendidas entre 20 Hz



e 20 000 Hz. Ou seja, o ouvido humano é sensível apenas



às ondas sonoras cujas frequências estejam compreendidas PARA REFLETIR nesse intervalo. Esses números são considerados valores



padrão e variam de uma pessoa para outra e, muito, com Por que a velocidade do som, para os meios



a idade do ouvinte. Um fato alarmante que os médicos têm citados, é menor na borracha? detectado na conturbada vida atual é o estreitamento dessa



Editora Bernoulli 53



Frente C Módulo 12

QUALIDADES FISIOLÓGICAS A

intensidade depende da **amplitude** (A) da onda sonora e, dessa forma, da energia (E) transportada pela onda e

DO SOM necessária para produzi-la. Se você fala com um volume de voz mais elevado, por exemplo, as moléculas de ar vão vibrar

O osciloscópio é um aparelho capaz de captar um sinal com maior amplitude, a onda sonora terá maior intensidade,

de áudio (onda sonora), que é longitudinal, e

apresentar, e você gastará mais energia.

sinal de entrada. A figura a seguir mostra, respectivamente, $\uparrow \mid$ intenso $\Rightarrow A$ maior $\Rightarrow E$ maior $\Rightarrow$ mais FORTE Som MAIS em sua tela, uma “onda transversal” que corresponde ao

a onda sonora (som) progressiva – que se desloca ao longo $\downarrow$ MENOS in nt enso $\Rightarrow A$ menor $\Rightarrow E$ menor $\Rightarrow$ mais FRACO $\downarrow \mid$ do meio de propagação – e a tela do aparelho.

As figuras (a) e (b) a seguir mostram, na tela do osciloscópio, dois sons de mesma altura (mesma frequência),

..... que se deslocam até o aparelho. Veja que o som (b)

.....

..... tem maior amplitude (A) e, dessa forma, é mais intenso $\Rightarrow$

.....

..... e mais forte.
.....

.....

.....

Veja que as compressões e rarefações da onda a) b) sonora são representadas no osciloscópio por cristas

e por vales, respectivamente. Dessa forma, fazendo a leitura do aparelho, podemos determinar as grandezas características da onda sonora (período, frequência, A figura a seguir mostra, de forma aproximada, velocidade, comprimento de onda e amplitude). Ou seja, a densidade das moléculas de ar correspondente aos sons

Nas figuras a seguir, representaremos, exceto quando velocidade (v). Observe que os comprimentos de onda são iguais para as duas ondas. especificado o contrário, a onda sonora conforme vista o osciloscópio nos permite “visualizar” a onda sonora. (a) e (b), que se deslocam através do meio com a mesma

na tela do osciloscópio. v v

O ouvido humano é capaz de perceber três características

no som, conhecidas como qualidades fisiológicas do som,

as quais nos permitem distinguir sons uns dos outros. Essas

qualidades são: altura, intensidade e timbre.

ALTURA λ_A λ_B

podemos diferenciar os sons **graves** dos sons **agudos**. A **altura do som** é a qualidade fisiológica pela qual O som de um trovão é intenso (forte) e baixo (grave). O som emitido por um pernillongo é exatamente o oposto do som emitido pelo trovão: ele é um som pouco intenso (fraco) A altura é uma característica relacionada com a **frequência** (f) e alto (agudo). Uma sirene típica emite som forte e alto. do som. Na música, a altura do som é usada para classificar A batida do coração, que mal ouvimos, é um som fraco e baixo.

as notas musicais. Assim, elas (dó, ré, mi, fá, sol, lá, si) são

sons musicais de frequências e, claro, de alturas diferentes. Os pesquisadores mediram a intensidade sonora

Veja, a seguir, a relação entre essas grandezas. mínima (I) que uma pessoa pode escutar. Os valores

obtidos, para uma pessoa de audição normal, variam de

Som mais $\{ \{ 10^{-16} \text{ W/m}^2 \text{ a } 10^{-12} \text{ W/m}^2$. Neste estudo, vamos considerar ALTO $| \Rightarrow f$ maior $\Rightarrow$ mais AGUDO $\{$ que esse valor seja $I = 10^{-12} \text{ W/m}^2$. Não é necessário você BAIXO $\Rightarrow f$ menor $\Rightarrow$ mais GRAVE $| |$ o guardar esse número, pois, se for indispensável na solução

As figuras a seguir mostram duas ondas sonoras (a) e (b). de algum exercício, ele será fornecido.

O eixo horizontal do osciloscópio está calibrado para o
O nível de intensidade sonora (N) determina a relação
entre

mesmo intervalo de tempo. Observe que a onda (b)
tem o a intensidade (I) de um som e a intensidade
mínima (I₀): o dobro da frequência de (a). Dessa forma,
o som (b) é mais

alto e mais agudo que o som (a). $N = \log I / \log I_0$

a) O nível de intensidade sonora (N) é medido, na
equação b)

anterior, em uma unidade chamada bel (B). Sons
comuns,

como aqueles que ocorrem em uma conversa
moderada,

giram em torno de 4 B. Sons mais fortes, como o som
de

INTENSIDADE veículos em um trânsito intenso,
são próximos de 8 B.

O limiar da dor, ou seja, a intensidade sonora máxima
que

A **intensidade do som** é a qualidade fisiológica que
nosso ouvido pode tolerar, corresponde a sons cujo

nível de

nos permite diferenciar os sons **fortes** dos sons **fracos**.
intensidade sonora é maior que 12 B. O nível ou
volume sonoro estão associados a essa qualidade.
Lembre-se de que: $\log y = x_x = y_{10} \Rightarrow 10$

54 Coleção Estudo

Som e efeito Doppler

Vamos comparar a intensidade sonora para os
seguintes Isso é possível porque cada instrumento
possui um timbre

valores de níveis de intensidade: peculiar e
característico. Quando reconhecemos a voz de

uma pessoa, mesmo que não a vejamos, é devido ao
fato

$N = 4 \text{ B } 4 = \log (I / 10) I = 10 \text{ W/m}^2 \Rightarrow -12 \text{ dB} \Rightarrow -82 \text{ dB}$
de que cada indivíduo possui um timbre de voz.

$N = 5 \text{ B } / 10^{-12} I_2 \Rightarrow 5 = \log (I = 10^{-7} \text{ W/m}^2 \Rightarrow \text{O}$
timbre que caracteriza um determinado violão, ₂

N por exemplo, depende de vários fatores. Entre
eles, podemos $= 6 \text{ B } 6 = \log (I_3 \Rightarrow / 10^{-12})_3 \Rightarrow I =$
 10^{-6} W/m^2 citar os diversos harmônicos da corda
que está em vibração,

Assim, a intensidade relativa de cada um desses harmônicos, $= 10.I = 100.I_{321}$ o formato da caixa de ressonância (que é um tubo fechado) e

Observe que cada unidade que se aumenta no nível de o material de que ela é feita. Você já deve ter notado que dois

intensidade, em B, corresponde a multiplicar a intensidade violões, aparentemente idênticos, podem emitir sons distintos.

sonora por 10. Dessa forma, um som de 8 B é 1 000 vezes A figura a seguir representa sons emitidos por uma flauta (a)

mais intenso que um outro de 5 B. e por um piano (b), analisados através do osciloscópio.

Observe que os sons correspondem à mesma nota musical,

É usual que o nível de intensidade sonora seja fornecido

pois apresentam a mesma frequência (mesmo período).

em dB (decibel), que corresponde à décima parte do bel.

Os sons apresentam, também, a mesma intensidade, pois

Assim, $1 B = 10 \text{ dB}$. Se o nível de intensidade sonora estiver eles possuem a mesma amplitude. Entretanto, a forma da

em dB, você deve dividir por 10 para obter o valor em bel onde é diferente para os dois sons. Dessa forma, o nosso

e, assim, poderá usar a equação anterior. ouvido consegue distinguir um som do outro.

A figura a seguir mostra a intensidade e o nível de intensidade sonora para diversas faixas de frequência.

Limiar da a)

) dor

) 10^{12}

2

10^{10-2}

10^{-4} 8

10^{-6} 6 Região da fala b)

10^{-8} 4 Limiar da FÍSICA

10^{-10} audição 2

Intensidade (W/m^2) 10^{10} o Nível de intensidade (B

10 20 100 200 1000 4000 10000 20000 EFEITO DOPPLER

Frequência (Hz) Imagine duas situações bem conhecidas de todos.

Observe na figura que, próximo dos 4 000 Hz, somos ambulância passa com a sirene ligada. Quando ela se aproxima Primeira situação: você está parado no passeio e uma

capazes de ouvir sons com as menores intensidades. Veja, de você e depois se afasta, você percebe que o som da sirene,

ainda, que a região da fala é bem mais “estreita” (entre inicialmente, parece mais alto (agudo) e, posteriormente,

200 Hz e 10 000 Hz, aproximadamente) do que a região de mais baixo (grave). Segunda situação: considere que você

audição. Vale ressaltar que as ondas sonoras com frequências está com uma lancha em uma lagoa. O vento faz com que

próximas a 20 Hz ou 20 000 Hz (limites de audição) exigem ondas (“marolas”) atinjam a embarcação, com determinada

uma intensidade sonora muito elevada, próxima do limiar frequência. Se a lancha se movimenta de encontro a

da dor, para serem ouvidas. Deve ficar claro que os valores essas ondas, ela será atingida por uma quantidade maior

mostrados variam de uma pessoa para outra. de cristas e o navegante achará que a frequência das ondas

aumentou. Entretanto, se a lancha se movimenta no

TIMBRE sentido das ondas, ela será atingida por uma quantidade

menor de cristas e o navegante achará que a frequência das

O **timbre do som** é a qualidade fisiológica que nos permite ondas diminuiu. Nos dois exemplos, a **frequência percebida**

Ele está relacionado com a **forma** da onda sonora resultante. verdadeiras das fontes emissoras. Essa alteração da frequência percebida, devido ao movimento relativo entre a fonte Quando vibramos a corda de um instrumento musical, distinguir sons provenientes de diferentes fontes sonoras. pelo observador está alterada em relação às frequências

de ondas e o observador, é conhecida como efeito Doppler e

por exemplo, ela provoca a vibração dos diversos elementos

pode acontecer com qualquer tipo de onda.

materiais que compõem o instrumento. Dessa forma, várias

Considere uma fonte pontual emitindo ondas circulares

ondas são geradas simultaneamente. A combinação de todas

centradas na posição F. Os observadores A e B,
colocados

essas vibrações e dos diversos harmônicos da corda produz nas posições indicadas, recebem tais ondas com um

uma onda típica e característica do instrumento. A frequência mesmo comprimento de onda λ , conforme a figura a seguir. dessa onda será, sempre, a frequência fundamental da Nela, cada linha representa uma crista da onda. Uma

corda que está em vibração. Se dois instrumentos musicais vez que a velocidade da onda é a mesma, as frequências

diferentes emitirem sons de mesma altura e de mesma percebidas pelos observadores são idênticas e iguais

intensidade, poderemos distinguir um som do outro. à frequência da fonte que gerou as ondas.

Editora Bernoulli 55

Frente C Módulo 12

O efeito Doppler tem muitas aplicações no nosso dia a dia.

O radar, que monitora a velocidade de veículos nas

estradas,

é uma dessas aplicações. Considere um veículo que se aproxima do radar. O aparelho emite uma onda de frequência f_0

Devido ao movimento de aproximação, o carro funciona que é refletida pelo veículo e volta para o dispositivo.

A B

como uma fonte em movimento, “emissora” de ondas refletidas que o radar recebe de volta com uma frequência f ,

maior que f_0 . Conhecendo-se os valores dessas frequências f_0 e da velocidade da onda, o dispositivo determina e indica a

velocidade
do
veículo.

Agora, imagine que a fonte se movimenta para a direita As ondas eletromagnéticas, como a luz, também

com determinada velocidade (v apresentam efeito Doppler. A frequência da luz está associada λ). A velocidade da onda não c à cor da radiação emitida. Considere uma fonte irradiando, é alterada pelo movimento da fonte, pois aquela depende

apenas do meio de propagação. Dessa forma, cada crista, por exemplo, luz monocromática amarela. Se essa fonte

embora circular (velocidade constante), está centrada na se aproxima de um observador, com grande velocidade,

posição em que a fonte se encontrava no momento que a luz recebida por ele tende para o azul (frequência maior).

aquela crista foi gerada. Logo, os observadores A e B Se a fonte, por outro lado, se afasta do observador, a luz

recebem as ondas como se o comprimento de onda estivesse que ele recebe tende para o vermelho (frequência menor).

alterado. Assim, eles percebem frequências distintas e Por meio de potentes telescópios que vasculham o Universo,

diferentes da frequência da fonte. Veja a seguir. alguns cientistas perceberam que as luzes emitidas pelas

estrelas que estão à nossa volta estão desviadas para o vermelho. Dessa forma, eles concluíram que todas as estrelas se afastam de nós e umas das outras. A única

explicação, até agora, para esse afastamento é considerar o

v Universo em expansão. Os cientistas mediram a velocidade_F

com que as estrelas se afastam, usando o efeito Doppler,

A B F e concluíram, também, que quanto maior o afastamento de

uma estrela, maior a sua velocidade de afastamento.

Para que exista alteração na frequência da luz, como

λ λ consequência do efeito Doppler, a velocidade da fonte ou v_B do observador deve ser comparável à velocidade da luz. c

λ Dessa forma, a equação apresentada anteriormente não $v_B < c \Rightarrow$

$$v_B > c \Rightarrow f_A > f_B$$

é aplicável para ondas eletromagnéticas, pois, nesse caso,

A frequência percebida fica também alterada se os efeitos relativísticos devem ser considerados.

observadores se deslocam em relação à fonte.

Considere

a fonte em repouso. Se o observador se aproxima dela,

EXERCÍCIO RESOLVIDO ele recebe uma quantidade maior de cristas por unidade

de tempo, pois ele vai de encontro a elas. Dessa forma,

o observador percebe uma frequência maior que a frequência

emitida pela fonte. Se o observador se afasta da fonte, **01.** Uma fonte sonora, em repouso, emite ondas com ele recebe uma quantidade menor de cristas num certo frequência f , que se propagam no ar com velocidade v intervalo de tempo, pois ele tenta escapar das cristas. Assim, $v = 330 \text{ m/s}$. Um carro de corrida, com um detector

a frequência percebida é menor do que a frequência instalado em seu interior, se aproxima e depois afasta-se

emitida pela fonte. O fenômeno fica ainda mais evidente dessa fonte. O detector acusa que a frequência

quando existe um movimento no qual tanto a fonte quanto de aproximação é o dobro da frequência durante o

o observador se afastam ou se aproximam um do outro. afastamento do veículo. Determinar a velocidade do carro.

Para o caso das ondas sonoras, a frequência aparente **Resolução:**

– aquela percebida pelo observador – pode ser calculada, Sejam f_1 e f as frequências aparentes de aproximação em relação à frequência da fonte, pela equação: f_2

e de afastamento do carro de corrida, respectivamente.

aproximação entre fonte e observador. Se algum deles se Nessa equação, os sinais se referem a uma dupla $f \left(\frac{v}{v \pm v_{\text{OBSERVADOR}}} \right)$ Como a fonte está em repouso, $v_{\text{FONTE}} = 0$. Assim, $f_{\text{SOM}} = f \cdot \left| \frac{v}{v \pm v_{\text{OBSERVADOR}}} \right|$ a equação do efeito Doppler, nos dois casos, será: $f_{\text{SOM}} = f \cdot \left| \frac{v}{v \pm v_{\text{OBSERVADOR}}} \right|$ $f_{\text{CARRO 1}} = f_0 \cdot \left| \frac{v}{v \pm v_{\text{CARRO}}} \right|$; $f = f_0 \cdot \left| \frac{v}{v \pm v_{\text{CARRO}}} \right|$ $f_{\text{SOM}} = f_0 \cdot \left| \frac{v}{v \pm v_{\text{CARRO}}} \right|$ $f_{\text{SOM}} = f_0 \cdot \left| \frac{v}{v \pm v_{\text{CARRO}}} \right|$

movimentar no sentido de afastar-se, o sinal da respectiva

velocidade deve ser alterado. Por exemplo, se o observador Como $f = 2f$, temos que: $1/2$

tenta afastar-se da fonte, v deve ter sinal negativo.

OBSERVADOR (Se a fonte tenta afastar-se do observador, v deve ter sinal v v $\backslash$ FONTE SOM $+$ $\backslash$ $v - v_{\text{CARRO}}$ f $|$ $|$ SOM CARRO $|$ positivo. É claro que, se o observador ou a fonte estiverem $0 = 2.f$ $|$ v $|$ 0 $|$ v $|$ $\backslash$ SOM $\backslash$ SOM $\backslash$ em repouso, a sua velocidade é nula, e a equação se torna

mais simples. Vale ressaltar que essa equação só é válida $\Rightarrow v + v = 2(v - v) \Rightarrow v = v/3$ SOM CARRO SOM CARRO CARRO SOM para velocidades da fonte e do observador menores que a velocidade da onda. $\Rightarrow v = 110 \text{ m/s} = 396 \text{ km/h}$. CARRO

56 Coleção Estudo

Som e efeito Doppler

EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO 04. (FMABC-

SP) Um violonista obtém diferentes notas musicais tocando uma mesma corda, prendendo-a em **01**. (Fatec-SP) Ondas sonoras são compressões e rarefações pontos diferentes do braço do violão. Desse modo,

do meio material através do qual se propagam. Podemos ele varia o comprimento da parte que vibra da corda

dizer que conseguindo, assim, emitir sons de diversas frequências.

A) o som pode propagar-se através do vácuo. Isto ocorre porque

B) o som não pode propagar-se através de um sólido. A) a frequência do som é tanto menor quanto maior for

C) o som somente se propaga através do ar. o comprimento da parte que vibra (da corda).

D) as ondas sonoras transmitem-se mais rapidamente B) a frequência do som é tanto maior quanto menor for

através de líquidos e de sólidos do que através do ar. a força tensora da parte que vibra.

E) para as ondas sonoras, não se verificam os fenômenos C) a frequência do som será tanto maior quanto maior

de interferência nem de difração. for a massa da corda.

02. D) a frequência do som não depende da massa da corda

(UFMG) Ao tocar um violão, um músico produz ondas vibrante.

nas cordas desse instrumento. Em consequência, são

produzidas ondas sonoras que se propagam no ar. E) a frequência do som não depende da força tensora

Comparando-se uma onda produzida em uma das cordas na corda vibrante.

do violão com a onda sonora correspondente, é

CORRETO 05. (UFU-MG) Um morcego, voando com velocidade v

afirmar que as duas têm o

em direção a uma superfície plana, emite uma onda

A) a mesma amplitude. ultrassônica de frequência f_0 . Sabendo-se que a

B) a mesma frequência. velocidade do som é v , a variação de frequência ouvida

C) a mesma velocidade de propagação. pelo morcego será

03. D) o mesmo comprimento de onda. $\left(\frac{v}{\lambda} \right) \Delta f = f_0 \cdot \left| \frac{v}{v_0} - 1 \right|$
(PUC Minas) As vozes de dois cantores, emitidas nas o

mesmas condições ambientais, foram representadas em $\left(\frac{v}{\lambda} \right) \Delta f = f_0 \cdot \left| \frac{v}{v_0} - 1 \right|$ um osciloscópio e apresentaram os aspectos geométricos $\Delta f = f_0 \cdot \left| \frac{v}{v_0} - 1 \right|$.
 $\left(\frac{v}{\lambda} \right)$ **FÍSICA** indicados a seguir:

$$\begin{aligned} y \text{ (m)} &= \left(\frac{2v}{\lambda} \right) \Delta f = f_0 \cdot \left| \frac{v}{v_0} - 1 \right| \cdot \left(\frac{v}{\lambda} \right) x \text{ (m)} \quad A \left(t \right) \\ (s) \quad v &= v_0 + \left(\frac{v}{\lambda} \right) \Delta f = f_0 \cdot \left| \frac{v}{v_0} - 1 \right| \cdot \left(\frac{v}{\lambda} \right) x \text{ (m)} \quad B \quad 0 \quad t \end{aligned}$$

(s) EXERCÍCIOS PROPOSTOS

A respeito dessas ondas, foram feitas várias afirmativas:

1. As vozes possuem timbres diferentes. **01.** (FCMMG / Adaptado) As figuras seguintes representam

2. As ondas possuem o mesmo comprimento de onda. três ondas sonoras que se propagam em um mesmo meio,

3. Os sons emitidos possuem alturas iguais. captadas por um microfone em momentos diferentes

e transformadas em ondas transversais na tela de um

4. As ondas emitidas possuem a mesma frequência.

5. Os sons emitidos possuem a mesma intensidade.

Onda 1 Onda 2

6. As ondas emitidas possuem amplitudes diferentes.

7. O som indicado em A é mais agudo do que o indicado em B.

Onda 3

8. Os períodos das ondas emitidas são iguais.

O número de afirmativas **CORRETAS** é igual a

A) 3. Quanto às suas características, pode-se afirmar que

B) 4. A) as três ondas têm timbres diferentes.

C) 5. B) as ondas 1 e 2 têm o mesmo período.

D) 6. C) as ondas 2 e 3 têm a mesma frequência.

E) 7. D) a onda 3 tem maior comprimento de onda do que a 1.

Editora Bernoulli **57**

Frente C Módulo 12

02. (FUVEST-SP-2010) Um estudo de sons emitidos por Assinale instrumentos musicais foi realizado usando um microfone A) se apenas I e II estiverem corretas.

ligado a um computador. O gráfico a seguir, reproduzido da

B) se apenas I estiver correta.

tela do monitor, registra o movimento do ar captado pelo

microfone, em função do tempo, medido em milissegundo, C) se apenas I e III estiverem corretas.

quando se toca uma nota musical em um violino. D) se apenas IV estiver correta.

05. (PUCPR) As qualidades fisiológicas do som são altura,

intensidade
e
timbre.

I. A altura é a qualidade que permite distinguir um som forte de um fraco de mesma frequência.

0 5 10 t (ms) II. Intensidade é a qualidade que permite distinguir um

som agudo de um som grave.

Nota dó ré mi fá sol lá si III. Timbre é a qualidade que permite distinguir dois sons

Frequência (Hz) 262 294 330 349 388 440 494 de mesma altura emitidos por fontes diferentes.

A) Somente I é correta.

Consultando a tabela anterior, pode-se concluir que o som

produzido pelo violino era o da nota B) Somente II é correta.

A) C) Todas estão corretas. dó. D) lá.

B) D) I e II estão corretas. mi. E) si.

C) sol. E) Somente III é correta.

03. 06. (UFMG) Uma onda sonora de uma determinada (FCMMG) A figura mostra a forma da onda sonora

de dois instrumentos. As ondas dos dois instrumentos frequência

está se propagando dentro de um tubo

têm em comum com gás. A figura representa, em um dado instante,
a densidade de moléculas do gás dentro do tubo:
região mais escura corresponde à maior densidade.

Se a fonte sonora que emitiu esse som aumentar

sua
intensidade

M N

A) a mesma intensidade. C) a mesma frequência.

B) a mesma amplitude. D) o mesmo timbre.

04. (UFU-MG) A figura a seguir mostra as diversas formas das
ondas sonoras produzidas pelos instrumentos musicais, A) a
densidade do gás na região M aumenta e a

emitindo a mesma nota e com a mesma intensidade. densidade em
N diminui.

B) a densidade do gás na região M diminui e a densidade

Diapasão

em
N
aumenta

Flauta C) a distância entre as regiões M e N aumenta.

Violino D) a distância entre as regiões M e N diminui.

Voz (Ar) **07.** (PUC Minas) Em linguagem técnica, um som

Clarinete que se propaga no ar pode ser caracterizado,

entre outros aspectos, por sua altura e por sua

Análise as afirmações a seguir: intensidade. Os parâmetros físicos da onda sonora

que correspondem às características mencionadas

I. As ondas da figura anterior apresentam a mesma

são,
respectiv

altura.

A) comprimento de onda e velocidade.

II. As ondas da figura anterior apresentam o mesmo

timbre. B) amplitude e velocidade.

III. A onda produzida pelo violino se propaga no ar com C) velocidade e amplitude.

o mesmo comprimento de onda que tinha na corda. D) amplitude e frequência.

IV. As ondas sonoras são transversais. E) frequência e amplitude.

58 Coleção Estudo

Som e efeito Doppler

08. (UFF-RJ) Ondas sonoras emitidas no ar por dois **11.** (UFU-MG) Um estudante de Física se encontra a uma

instrumentos musicais distintos, I e II, têm suas certa distância de um paredão, de onde ouve o eco de sua

amplitudes representadas em função do tempo pelos voz. Desejando

calcular a que distância se encontra do

gráficos a seguir. paredão, ele bate palmas de forma ritmada, de maneira

(I) que escuta a sequência palma-eco-palma-eco... Se ele Amplitude bate palmas a cada segundo e a velocidade do som no ar é 340 m/s, a sua distância ao paredão é de

Tempo A) 22,5 m. D) 340 m.

B) 85 m. E) 425 m.

(II) C) 170 m. Amplitude

12. (PUC RS) Denomina-se eco o fenômeno em que se ouve

Tempo nitidamente um som refletido por obstáculos, uma ou mais vezes sucessivas. Sabe-se que o ouvido humano

A propriedade que permite distinguir o som dos dois só distingue dois sons que se sucedem num intervalo de

instrumentos é tempo igual ou superior a 0,10 segundo. Considera-se que

a velocidade do som no ar seja de 350 m/s. De posse desses

A) o comprimento de onda.

dados, pode-se concluir que uma pessoa ouve o eco de sua

B) a amplitude.

própria voz se estiver afastada do obstáculo refletor em,

C) o timbre.

no
mínimo,

D) a velocidade de propagação.

A) 17,5 m. C) 40,0 m. E) 74,0 m.

E) a frequência.

B) 34,0 m. D) 68,0 m.

09. (FCMMG–2009) Antes de começar um concerto, os músicos

afinam seus instrumentos. Quando o violinista afrouxa **13.** (FUVEST-SP) O som de um apito é analisado com o uso

uma das cordas de seu instrumento, tentando ajustá-la, de um medidor que, em sua tela, visualiza o padrão **FÍSICA**

vibrando a corda, o novo som emitido terá menor apresentado na figura a seguir. O gráfico representa a

A) comprimento de onda. variação da pressão que a onda sonora exerce sobre o

B) frequência. medidor, em função do tempo, em μs ($1 \mu\text{s} = 10^{-6} \text{ s}$).

C) velocidade. Analisando a tabela de intervalos de frequências

D) amplitude. audíveis, por diferentes seres vivos, conclui-se que esse

apito pode ser ouvido apenas por

10. (UEM-PR) O violão é um instrumento de cordas cujas

extremidades são fixas. Quando tangidas, as cordas **Seres vivos**
Intervalos de frequência

vibram, provocando compressões e rarefações no ar.

Cachorro 15 Hz – 45 000 Hz

O som emitido pelas cordas é amplificado pela caixa do

instrumento, que vibra juntamente com elas e com o ar Ser humano
20 Hz – 20 000 Hz

contido em seu interior. Considere um violão com cordas

Sapo 50 Hz – 10 000 Hz

do mesmo material, mas de diferentes espessuras,

e assinale a alternativa **CORRETA**. Gato 60 Hz – 65 000 Hz

A) Ao tanger uma das cordas livres do violão, ela vibrará Morcego 1
000 Hz – 120 000 Hz

com uma determinada frequência; se o músico tanger
a mesma corda pressionada em alguma altura do braço
do violão, esta vibrará com uma frequência maior. o

B) Quanto maior a tensão a que uma corda está sujeita,

menor será a frequência de vibração da mesma. riação de
pressã

C) As cordas do violão possuem o mesmo comprimento Va Tempo
10 μ s

e diferentes espessuras para que possam vibrar na A) seres
humanos e cachorros. mesma frequência quando sujeitas à
mesma tensão.

B) seres humanos e sapos.

D) A frequência não depende do comprimento da corda

C) sapos, gatos e morcegos.

tangida.

E) A velocidade do som na corda é diretamente D) gatos e
morcegos.

proporcional à densidade da corda. E) morcegos.

Frente C Módulo 12

14. (UFRN) A intensidade de uma onda sonora, em W/m^2 , **15.** (UFU-MG) Um show de *rock* foi interrompido porque

é uma grandeza objetiva que pode ser medida com o nível sonoro estava muito elevado. A polícia

instrumentos acústicos sem fazer uso da audição permitiria a continuação do espetáculo somente se

humana. O ouvido humano, entretanto, recebe a o nível sonoro fosse reduzido em 30 dB. Por qual

informação sonora de forma subjetiva, dependendo fator os organizadores do *show* deverão diminuir a energia

das condições auditivas de cada pessoa. Fato da fonte sonora?

já estabelecido é que, fora de certo intervalo A) 3 000 C) 1 000

de frequência, o ouvido não é capaz de registrar

B) 30 D) 10

a sensação sonora. E, mesmo dentro desse intervalo,

é necessário um valor mínimo de intensidade da onda **16.** (UECE) O “nível de intensidade sonora” N é medido numa

para acionar os processos fisiológicos responsáveis

escala logarítmica e está relacionado com a intensidade

pela audição. Face à natureza do processo auditivo

física I da onda pela expressão:

humano, usa-se uma grandeza mais apropriada

para descrever a sensação auditiva. Essa grandeza $N = 10 \log I/I_0$

é conhecida como nível de intensidade do som. Em que I_0 é a intensidade do mais fraco som audível.

(medida em decibel). A figura a seguir mostra Se $I = 10I_0$, tem-se $N = 10 \log 10$

a faixa de audibilidade média do ouvido humano, $N = 10 \text{ dB}$ ($\text{dB} = \text{decibel}$)

relacionando a intensidade e o nível de intensidade

Um cachorro ao ladrar emite um som cujo nível de intensidade com a frequência do som.

intensidade é 65 dB. Se forem dois cachorros latindo ao

Intensidade (W/m^2 mesmo tempo, em uníssono, o nível de intensidade será $2 \times$)

Nível de intensidade (dB) Limiar da dor (Use $\log 2 = 0,30$)

10 A) 65 dB. C) 85 dB. D) 120

10-2 100 B) 68 dB. D) 130 dB. 10-4 80

10-6 Região da fala **60 17.** (CEFET-MG-2010) Ao se observar a cor da luz emitida 10-8 40 por uma estrela, nota-se um desvio para o vermelho.

10-10 20 Limiar da Área do som Tal fenômeno deve-se ao fato de esse astro

10-12 audição 0 Frequência (Hz) A) estar morrendo.

0 B) ter sua luz refratada. 20 50 100 200 500 1 000 2 000 5 000 C) ter a velocidade da luz. 10 000 20 000

D) estar se afastando da Terra.

E) estar muito distante da Terra.

1. Limiar da audição (intensidade mais baixa do som
18. (ITA-SP) Uma fonte sonora F emite no ar um som de

onde começamos a ouvir).

frequência f , que é percebido por um observador em O.

2. Limiar da dor (intensidade sonora máxima que nosso Considera as duas situações seguintes:

ouvido pode tolerar). I. A fonte aproxima-se do observador, na direção F – O,

3. Região da fala. com uma velocidade v , estando o observador

parado. A frequência do som percebido pelo

Considerando as informações e o gráfico anterior, observador é f_1 .
é **CORRETO** afirmar que II. Estando a fonte parada, o observador aproxima-se

A) na faixa de 2 000 Hz a 5 000 Hz o ouvido humano é da fonte, na direção O – F, com uma velocidade v .

capaz de perceber sons com menor intensidade. Nesse caso, o observador percebe um som de

B) a frequência máxima de audição do ouvido humano frequência f_2 .

é 10 000 Hz. Supondo que o meio esteja parado e que v seja menor

C) acima da intensidade 10 W/m^2 podemos ouvir f_2 que a velocidade do som no ar, pode-se afirmar que

qualquer frequência. A) $f > f_1 > f_2$. D) $f = f_1 < f_2$

D) ao falarmos geramos sons no intervalo aproximado B) $f_1 = f_2 > f$. E) $f_1 > f > f_2$.

de frequência de 200 Hz a 20 000 Hz. C) $f_2 > f_1 > f$.

60 Coleção Estudo

Som e efeito Doppler

19. (FCMMG–2007) Numa piscina artificial, uma estrutura gera **22.** (UFRJ) Um artesão constrói um instrumento musical rústico

pulsos retos na superfície da água, na razão de 2 pulsos por usando cordas presas a dois travessões. As cordas são todas

segundo, criando ondas que se deslocam a uma velocidade de mesmo material, de mesmo diâmetro e submetidas à

de 1,0 m/s. Rafael nada com a velocidade de 1,5 m/s, indo mesma tensão, de modo que a velocidade com que nelas

de encontro às ondas produzidas, como está representado se propagam ondas transversais seja a mesma. Para que

na figura. A frequência com que Rafael perceberá as ondas o instrumento possa emitir as diversas notas musicais,

retas será de ele utiliza cordas de comprimentos diferentes, como mostra

a
figura.

Corda mais longa

Corda mais curta

A) 1,0 Hz. C) 2,5 Hz.

B) 2,0 Hz. D) 5,0 Hz. Uma vez afinado o instrumento, suponha que cada

corda vibre em sua frequência fundamental. Que corda

20. (UDESC–2008) Um detector sonoro é instalado sobre emite o som mais grave, a mais longa ou a mais curta?

a linha de chegada do autódromo de Interlagos, em **JUSTIFIQUE** sua resposta.

São Paulo. No Grande Prêmio de Fórmula 1 do Brasil,

SEÇÃO ENEM

chegada, o detector percebe uma frequência sonora f_1 ,

produzida pelo motor do carro. O carro se aproxima e

cruza a linha de chegada com velocidade constante.

01. (Enem–2009) *Os radares comuns transmitem micro-ondas*

que refletem na água, gelo e outras partículas na

o cálculo da velocidade do carro, ao cruzar a linha de *distância das partículas, tais como gotas de chuva. O radar FÍSICA* chegada? (v é a velocidade do som no ar, f é a frequência Qual das expressões a

seguir representa **CORRETAMENTE** atmosfera. Podem, assim, indicar apenas o tamanho e a

Doppler, além disso, é capaz de registrar a velocidade e a

do som produzido pelo motor com o carro em repouso, direção na qual as partículas se movimentam, fornecendo

e V é a velocidade do carro.) um quadro do fluxo de ventos em diferentes elevações.

A) $v(f)$ Nos Estados Unidos, a Nexrad, uma rede de 158 radares + f) $v(f - f)$ $V = 1$ D) $V = 1$ Doppler, montada na década de 1990 pela Diretoria $f + f$ f_{11} Nacional Oceânica e Atmosférica (NOAA), permite que

B) $v(f + f)$ $v(f + f)$ o Serviço Meteorológico Nacional (NWS) emita alertas $V = 1$ E) $V = 1$ f f sobre situações do tempo potencialmente perigosas com 1

C) $v(f + f)$ 1 V um grau de certeza muito maior.

= O pulso da onda do radar ao atingir uma gota de chuva, f 1 devolve uma pequena parte de sua energia numa onda

21. *de retorno, que chega ao disco do radar antes que ele*

(UFLA-MG) O radar utilizado em estradas para detectar

emita a onda seguinte. Os radares da Nexrad transmitem

veículos em alta velocidade funciona emitindo ondas

de frequência f_0 entre 860 e 1 300 pulsos por segundo, na frequência

de

, que são refletidas pelo veículo em

3
000
MHz.

aproximação. O veículo, após a reflexão da onda, passa então

a ser emissor de ondas para o radar, que irá detectá-las. FISCHETTI, M. Radar meteorológico: sinta o vento.

Sabe-se que objetos que se aproximam de uma fonte *Scientific American Brasil*. n. 08. São Paulo. Jan. 2003.

emissora refletem ondas com frequência maior do que

a emitida pela fonte. A variação No radar Doppler, a diferença entre as frequências Δf entre a frequência

emitida pelo radar f emitidas e recebidas pelo radar é dada por $\Delta f = (2u / c)f$, f_0 e a observada pela recepção dá onde u uma medida da velocidade v do veículo. Essa relação r é a velocidade relativa entre a fonte e o receptor,

é dada por: $c = 3,0 \times 10^8$ m/s é a velocidade da onda eletromagnética, $\Delta f = k.f_0 .v$, sendo $k = (2/3)10^{-8}$ s/m e $f = 50 \times 10^8$ Hz. Para um veículo que se aproxima f_0 é a frequência emitida pela fonte. Qual é a velocidade, v em km/h, de uma chuva, para a qual se registra no radar à velocidade de 108 km/h ($1 \text{ km/h} = 1/3,6 \text{ m/s}$),

esse radar deve ter uma precisão Doppler uma diferença de frequência de 300 Hz? Δf **MÍNIMA** de

A) 1 000 Hz. D) 1 Hz. A) 1,5 km/h D) 54 km/h

B) 100 Hz. E) 10 000 Hz. B) 5,4 km/h E) 108 km/h

C) 10 Hz. C) 15 km/h

Frente C Módulo 12

02. Para que uma pessoa possa ouvir as conversas de uma

outra, são necessários alguns parâmetros: a frequência

Propostos

e a intensidade do som emitido pela pessoa e os valores

máximos e mínimos da frequência e da intensidade

01.
C

sonora que o ouvinte consegue captar. O limiar de audição

caracteriza, para cada frequência, os valores mínimos 02. C

da intensidade sonora capazes de sensibilizar o sistema

auditivo de uma pessoa. O gráfico a seguir mostra, numa 03. C

mesma escala, as frequências e os níveis de intensidade

sonora de uma pessoa que está falando (A) e de outra 04. B

que está ouvindo (B).

05.
E

12

)

10 06. A

8 07. E

(A)

6 Região da fala 08. C

4 Limiar da 09. B 2 audição (B)

Nível de intensidade (B 10. A

0

11.

B

10 100 1 000 10 000

Frequência (Hz) 12. A

De acordo com o gráfico, o ouvinte (B) consegue captar todos os sons emitidos pela pessoa que está falando (A), 13. D desde que esteja perto dela, porque, necessariamente,

14.

A

A) as pessoas com audição normal são capazes de

escutar tudo aquilo que as outras pessoas falam, 15. C independentemente da frequência e da intensidade

dos sons emitidos. 16. B

B) todos os sons pronunciados têm nível de intensidade

17.

D

maior do que o limiar de audição do ouvinte (B) dentro da faixa de frequências emitidas.

18.

A

C) todos os sons pronunciados têm frequência menor

do que as frequências que o ouvinte B pode perceber 19. D dentro da faixa de níveis de intensidade emitidos.

D) a faixa correspondente à região da fala do emissor 20. D

(A) é composta de frequências que estão dentro da faixa de audição do receptor (B). 21. A

E) a intensidade, a frequência e o timbre sonoro dos sons 22. A velocidade das ondas nas cordas é a mesma,

emitidos são maiores do que aqueles que o ouvinte (B)

é capaz de perceber na situação descrita pelo gráfico. a frequência do som emitido é igual à frequência

fundamental de vibração da corda e o som

GABARITO mais grave corresponde à menor frequência.

A frequência fundamental é dada por $f = v/2L$.

Fixação Assim, a corda mais longa vai produzir o som

mais
grav

01. D Seção Enem 02. B

03. D

01.
D

62 Coleção Estudo

FÍSICA MÓDULO FRENTE Radiação de corpo negro e 16 D quantização da energia

No final do século XIX, a Física estava apoiada sobre duas Maxwell desenvolveu essas equações e mostrou que elas

grandes áreas: a Mecânica e o Eletromagnetismo. O conjunto de predizem a existência de ondas formadas por campos

leis e de conceitos físicos desenvolvidos até o final do século XIX magnéticos e elétricos oscilantes no tempo, cuja propagação

é chamado de Física Clássica. Nessa época, muitos cientistas no espaço constitui uma onda eletromagnética. Depois acreditavam que a Física havia se esgotado, e que, de realizar manipulações algébricas em suas equações, doravante, ela seria usada para o avanço da humanidade. Maxwell chegou à seguinte expressão para calcular a De certa forma,

essa previsão se confirmou. O extraordinário

desenvolvimento tecnológico ocorrido no século XX deveu-se, velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas

em grande parte, ao uso da Física Clássica. Carros, no vácuo: aviões, edificações de grande porte, entre tantos outros

exemplos, foram e continuam sendo projetados a partir 1 dos fundamentos da Mecânica, da Eletrodinâmica e da $v =$ Termodinâmica clássicas. Todavia, no início do século XX, ϵ μ .00

duas revoluções contrariaram a crença de que a Física fosse

apenas aquela desenvolvida até então e que nenhuma nova Nessa expressão, $\epsilon = 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}_2/\text{N.m}_2$ é a 0 descoberta seria possível. Em 1900, o físico alemão Max permissividade elétrica do vácuo, e $\mu = 4 \times 10^{-7} \text{ T.m/A}$ é 0 π Planck, ao estudar a radiação emitida por corpos negros, a permeabilidade magnética do vácuo. Você deve se lembrar

enunciou uma nova e revolucionária teoria, a quantização da de que usamos a permissividade elétrica em equações para

energia eletromagnética, cujos desdobramentos originaram a calcular forças, campos e capacitâncias elétricas, enquanto

Mecânica Quântica. Pouco depois, em 1905, Einstein divulgou

a permeabilidade magnética foi usada em equações para

a primeira parte da sua famosa Teoria da Relatividade.

A Mecânica Quântica e a Teoria da Relatividade constituem as calcular campos magnéticos gerados por correntes elétricas.

bases da Física Moderna. Muitos equipamentos e tecnologias Maxwell substituiu essas constantes na equação anterior e

atuais usam conceitos relativísticos e quânticos. O GPS, obteve o seguinte resultado para o valor da velocidade das

os transistores, o *laser*, os aceleradores de partículas, ondas eletromagnéticas no vácuo: os aparelhos de radioterapia e as usinas nucleares são apenas

alguns dos incontáveis exemplos da difusão da Física Moderna. $1 \text{ v} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ / Daí, a importância de estudá-la. $8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$. $4 \pi \times 10^{-7} \text{ T}^2/\text{A}^2$
Neste módulo, iniciaremos o estudo da Física Moderna, apresentando a teoria de Planck sobre a radiação de

corpo negro e a quantização da energia eletromagnética. Esse valor é exatamente igual à velocidade da luz

Nos módulos seguintes, veremos alguns desdobramentos no vácuo. Maxwell não achou que isso fosse uma mera

da Teoria Quântica e estudaremos a Teoria da Relatividade e coincidência, concluindo, corretamente, que a luz era um

algumas reações nucleares. Para introduzir esses conceitos, tipo de onda eletromagnética. precisaremos adquirir um pouco de conhecimento sobre as

As ondas eletromagnéticas podem ser geradas a ondas eletromagnéticas e, por isso, esse assunto constitui a

abertura deste módulo. partir da aceleração de uma carga elétrica, como o que

acontece em uma corrente elétrica alternada em um fio.

A ONDA ELETROMAGNÉTICA

Obviamente, a oscilação dessa carga produz um campo magnético variável no tempo e no espaço. Pensando na

A luz é uma onda eletromagnética

Lei da Indução de Faraday, Maxwell argumentou que a variação desse campo magnético produziria um campo

Em 1873, o físico escocês James Clerk Maxwell descobriu elétrico, que também seria variável. A variação desse

que as leis da eletricidade e do eletromagnetismo

campo elétrico deveria, por sua vez, causar o
aparecimento

podiam ser resumidas em um conjunto de quatro
equações, atualmente denominadas equações de de
um campo magnético variável. Assim, o campo
elétrico

Maxwell. A compreensão total dessas equações
demanda e o campo magnético, ambos, se
propagariam pelo espaço,

conhecimento da Matemática estudada no nível
superior, um gerando o outro. Tal propagação é a
chamada onda

e, portanto, as discutiremos apenas de forma
conceitual. eletromagnética.

Editora Bernoulli 63

Frente D Módulo 16



Após a divulgação dos trabalhos de Maxwell, muitos

físicos



iniciaram a empreitada de produzir artificialmente algum tipo



de onda eletromagnética. Em 1888, o físico alemão Heinrich **PARA REFLETIR**



Hertz conseguiu gerar as primeiras ondas eletromagnéticas, Certamente, você já deve ter notado ruídos



construindo emissores e detectores de ondas de rádio. de estática em seu rádio quando ocorre um



Em 1895, Röntgen descobriu os raios X, fazendo a primeira relâmpago. Às vezes, esses ruídos ocorrem



radiografia da história. Além da luz, das ondas de rádio e dos quando ligamos um interruptor de luz. Por raios X, outras ondas eletromagnéticas foram descobertas que isso ocorre? desde então, tais como as micro-ondas e a radiação gama,

essa última proveniente de reações nucleares. **O**
espectro eletromagnético

A figura 1 mostra uma onda eletromagnética que se propaga da esquerda para a direita, no sentido positivo do Na figura 1, observe a distância λ , que é o comprimento

eixo x. Nessa imagem, o campo magnético oscila em um de onda associado à onda eletromagnética dessa figura.

Podemos associar esse valor à distância entre dois pontos, plano vertical (eixo y), enquanto o campo elétrico oscila em ao longo da direção de propagação da onda, que estão em um plano horizontal (eixo z). Logo, os campos oscilam

em

concordância de fase e que apresentam valores iguais de

planos normais entre si e perpendicularmente à direção de

campo elétrico (ou de campo magnético). Observe que esse

propagação da onda. Por isso, as ondas eletromagnéticas

é o caso dos pontos P e Q mostrados. Bem antes de Maxwell

são ondas transversais.

ter descoberto a natureza eletromagnética da luz, Thomas

y

Young, no início do século XIX, já havia determinado

Comprimento o comprimento de onda de luzes monocromáticas

M de onda λ ($\approx 10 \text{ mm}$) através de experiências com franjas de λ

interferência projetadas em um anteparo.

A frequência de uma onda eletromagnética, assim como

N para qualquer outro tipo de onda, é imposta por sua fonte.

Campo P Ainda que a onda mude de meio (o que, em geral, faz

magnético $\times$ a velocidade e o comprimento de onda variarem), a sua Q Direção de Campo frequência permanece a mesma. Em um sinal de rádio de uma propagação

elétrico estação, a frequência da onda é determinada pela taxa de

Figura 1: A onda eletromagnética é a propagação de um campo oscilações das cargas elétricas livres na antena transmissora.

elétrico e de outro magnético, ortogonais entre si. No caso da luz emitida por um filamento de uma lâmpada

ou produzida em uma lâmpada de neônio, a frequência da

Um aspecto importante da figura 1 é que ela representa luz está relacionada com fenômenos quânticos no interior

o registro de um instante de tempo da propagação da dos átomos. Podemos calcular a frequência f de uma onda

onda, isto é, ela é a imagem congelada da onda. Nesse eletromagnética em função do seu comprimento de onda λ

instante, observe que os campos apresentam intensidade e de sua velocidade de propagação v através da equação

nula em certos pontos do eixo x (por exemplo, no ponto M), que você já conhece: enquanto possuem intensidade máxima em outros

pontos desse eixo (por exemplo, no ponto N). Após $v f = \lambda 1/4$ de período, os campos no ponto M possuirão

intensidade máxima, enquanto no ponto N eles apresentarão A figura 2 mostra alguns tipos de ondas presentes no

intensidade nula. Esse comportamento é semelhante espectro eletromagnético (existem mais), assim como as

àquele apresentado por ondas mecânicas, como uma suas frequências e os seus comprimentos de onda (no vácuo).

onda se propagando em uma corda elástica. Todavia, Observe a grande variedade de comprimentos de onda

ao contrário do que ocorre em uma onda mecânica, indicados na parte superior da figura, que se estendem desde

a propagação de uma onda eletromagnética não implica a valores ínfimos da ordem de dimensões

atômicas (os raios X

vibração de um meio material. Na onda eletromagnética, e gama) até comprimentos da ordem de quilômetros

o que oscila são os campos elétrico e magnético. De fato, (as ondas de rádio). As frequências correspondentes, indicadas

como as ondas eletromagnéticas podem se propagar no na parte inferior da figura, foram calculadas por meio da

vácuo, a presença de um meio material não é uma condição equação anterior, utilizando como valor para a velocidade das

necessária para a sua propagação. ondas eletromagnéticas no vácuo $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$.

64 Coleção Estudo

Radiação de corpo negro e quantização da energia

Comprimento de onda(m) EXERCÍCIO RESOLVIDO

01. A figura a seguir mostra um diagrama do espectro

eletromagnético.

Comprimento de onda (m)

Visível

10^{-15}



Raios Ultravioleta Rádio γ Micro-ondas Violeta $4,0 \times 10^{-7}$



Raios gama 10^{-13}



Raios X Infravermelho



10^{-11} Anil



10^{23} 10^{19} 10^{15} 10^{14} 10^{12} 10^{10} 10^5



Raios X



Frequência (Hz) 10^{-9} Azul $5,0 \times 10^{-7}$

Ultravioleta

Figura 2: Espectro eletromagnético. 10^{-7}

Verde

A velocidade da luz ¹⁰⁻⁵

De acordo com a Teoria da Relatividade, a matéria
não Infravermelho Amarelo ⁻⁷ $6,0 \times 10^{10-3}$

pode se mover mais rápido que a luz. Assim, podemos

Micro-ondas

estender essa ideia às ondas em geral. No vácuo, nada
se ¹⁰⁻¹ Laranja move com velocidade igual ou maior que
 $c = 3,0 \times 10^8$ m/s, TV

velocidade com a qual a luz, os raios X e todas as
outras Rádio ¹⁰¹ Vermelho FM ondas eletromagnéticas se
propagam. No ar, a velocidade $7,0 \times 10^{-7}$ **FÍSICA** Rádio
das ondas eletromagnéticas é um pouco menor,
comparada ¹⁰³ AM com a sua velocidade no vácuo.
Mesmo assim, o valor dessa

velocidade é o mesmo para todas as frequências, ou
seja, ¹⁰⁵

a luz azul, a luz vermelha, a onda de rádio e todas as
outras Ondas longas de rádio

formas de ondas eletromagnéticas propagam-se no ar
com ¹⁰⁷

velocidades idênticas. Esse comportamento é
verificado na

maioria dos gases. A) Explicar por que as ondas de rádio, na

extremidade

Nos meios sólidos e líquidos, como o vidro e a água, inferior do diagrama, são denominadas de ondas

a velocidade das ondas eletromagnéticas varia com a frequência longas.

da radiação. Nesses meios, chamados de dispersivos, B) Calcular as frequências extremas das ondas de rádio

a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas e dos raios gama apresentados no diagrama. torna-se menor com o aumento da frequência. Assim,

C) Especificar a onda de radar a ser usada para

na água, por exemplo, os raios X viajam mais lentamente

localizar um avião intercontinental, sabendo que a

que a radiação ultravioleta. Esta, por sua vez, possui menor

reflexão sobre a aeronave é mais eficiente quando

velocidade que a luz azul, e assim por diante. É por isso que

o comprimento de onda associado é da ordem de

um feixe de luz branca (luz solar, por exemplo) se dispersa ao

grandeza do avião. Explicar por que a informação

penetrar em um prisma de vidro. A porção violeta presente

contida na onda refletida permite saber se o avião

nesse feixe apresenta alta frequência em relação às outras

está se aproximando ou se afastando do radar.

luzes. Assim, ela sofre uma maior redução de velocidade e,

consequentemente, apresenta maior desvio. A luz vermelha, D) Uma pessoa sacode vigorosamente um bastão

de menor frequência e, portanto, maior velocidade no prisma, eletrizado. Explicar por que uma onda eletromagnética

é a parte da luz que sofre o menor desvio. O resultado emana do bastão. Estimar o comprimento de onda

disso é que o feixe de luz sofre dispersão, como estudado associado. Se possível, indicar a posição dessa onda

anteriormente em Óptica Geométrica. no diagrama anterior.

Editora Bernoulli 65

Frente D Módulo 16

Resolução: Além do Sol, outras fontes de luz são as lâmpadas de

A) As ondas eletromagnéticas de comprimento de onda filamento, fluorescentes e a vapor. A seguir, vamos entender

superiores a 10 m são usadas em radiotransmissões.

como esses corpos emitem luz. Veremos que, ao responderem

As ondas na extremidade inferior do diagrama são essa pergunta, os físicos proporcionaram o desenvolvimento

ondas de rádio com elevados comprimentos de ondas, da Física Quântica. podendo chegar à ordem de 10 milhões de metros.

Por isso, essa faixa do espectro é denominada de Curvas de radiação ondas longas de rádio.

B) Os comprimentos de ondas, λ , nos extremos do No estudo sobre transferência de calor, vimos que

diagrama são 10^{-15} m (raio gama) e 10^7 m (onda todos os corpos emitem constantemente radiação

longa de rádio). Para calcular as frequências, f , eletromagnética. Qualquer corpo emite uma mistura de todas

correspondentes, devemos usar a equação $c = \lambda \cdot f$, as radiações eletromagnéticas, com o comprimento de onda

em que $c = 3,0 \times 10^8$ m/s é o módulo da velocidade

(e a frequência) variando de zero a infinito. Isso está das ondas eletromagnéticas no ar. Substituindo

evidenciado na figura 3, que mostra as curvas de radiação

os valores nessa equação, obtemos 30 Hz para a

frequência da onda longa e $3,0 \times 10^8$ Hz para a dos raios gama. O pequeno comprimento de onda (e a

elevada frequência dos raios gama) explica por que Temperatura alta esse tipo de radiação apresenta um enorme poder

de penetração na matéria.

C) A ordem de grandeza de um avião intercontinental é ra Temperatura intermediária

de 10² m. Assim, a onda deve ter um comprimento de onda da ordem de 100 metros. Esse valor corresponde Temperatura baixa

a ondas de rádio de alta frequência. A análise da onda

refletida permite dizer se o avião está se aproximando Intensidade da ou se afastando do radar, por meio do efeito Doppler.

Comprimento de onda

Quando o avião se afasta do radar o sinal refletido

é percebido com um comprimento de onda maior *Figura 3: Curvas de radiações de sólidos*. que aquele do sinal enviado pelo radar. Se ocorrer o

Observe que as curvas da figura 3 apresentam picos.

contrário, o avião estará se aproximando.

Esses pontos de máximo revelam a existência de um

D) Como o bastão representa uma carga elétrica e

como ele apresenta uma aceleração, de

acordo com comprimento de onda λ (e uma frequência f) para $\lambda_{\text{máx}}$ $f_{\text{máx}}$

a Teoria de Maxwell, uma onda eletromagnética se O qual a energia eletromagnética emitida pelo sólido é

deriva do movimento do bastão. A frequência dessa máxima. Observe ainda que λ é cada vez menor à medida $\lambda_{\text{máx}}$ onda é a frequência de oscilação da carga, isto que a temperatura do corpo aumenta. Em outras palavras,

é, do bastão. O movimento do bastão é imposto à medida que essa temperatura torna-se maior, os picos

por uma pessoa, e a frequência de oscilação é da nas curvas de radiação deslocam-se para a esquerda.

ordem de 1 Hz. Usando a equação $c = \lambda \cdot f$, obtemos Quando um objeto está bastante quente, acima de 1 000 °C,

um comprimento de onda da ordem de 10⁸ m. ele emite radiação eletromagnética com predominância

No diagrama do espectro eletromagnético, essa

para baixos comprimentos de ondas (e altas frequências),

radiação aparece abaixo do eixo. A sua posição

correspondentes à faixa visível do espectro eletromagnético.

está indicada pela flecha desenhada na extremidade

É por isso que o filamento de uma lâmpada emite luz.

inferior da figura anterior.

Um objeto frio, como o seu livro, ou mesmo você,
emite

A QUANTIZAÇÃO DA ENERGIA

radiação eletromagnética predominantemente na faixa
do

infravermelho e de longos comprimentos de ondas.
Objetos a

ELETROMAGNÉTICA temperaturas de 200
°C, como as paredes do forno do fogão

a gás da sua casa, também irradiam
predominantemente

Quando Maxwell descobriu a natureza
eletromagnética da na faixa do infravermelho,
porém, com comprimentos de

luz, o seu caráter ondulatório já era consagrado.
Experiências ondas um pouco mais curtos. O carvão
em brasa possui

de difração e de interferência com a luz comprovavam
esse uma temperatura entre 600 °C e 700 °C, faixa em
que

fato. Então, os físicos fizeram uma nova pergunta
sobre a luz existe energia suficiente para que o corpo

adquira uma cor

e as ondas eletromagnéticas: como elas eram produzidas? vermelha escura.

66 Coleção Estudo

Radiação de corpo negro e quantização da energia

A temperatura absoluta T de um corpo negro e o $\lambda_{\text{máx}}$ Um corpo negro não precisa, necessariamente,

comprimento de onda ser da cor preta. O pequeno orifício no objeto oco λ relacionam-se por meio de uma $\lambda_{\text{máx}}$

equação empírica conhecida como a Lei do Deslocamento mostrado na figura 4, por exemplo, é um corpo negro,

de Wien, expressa por: pois a radiação que entra na cavidade tem pouca

chance de sair. Após sofrer múltiplas reflexões internas,

$\lambda_{\text{máx}} = \frac{b}{T}$ À medida que o corpo absorve essa radiação, ele também se T b a radiação é praticamente toda absorvida pelo corpo.

aquece. Quanto maior a sua temperatura, maior a quantidade

Nessa expressão, T é dado em kelvin, o comprimento de de radiação que ele emite (observe que os picos na figura 3

onda é calculado em metros, e b , a constante de Wien, vale são mais altos para as temperaturas maiores).

Assim,

0,0029 m.K. Observe que λ é inversamente proporcional a T . $T_{\text{máx}}$ o corpo atingirá uma temperatura de equilíbrio, na qual a taxa

Assim, na figura 3, se λ do corpo quente for metade do de radiação recebida torna-se igual à taxa de radiação emitida. $T_{\text{máx}}$

valor correspondente ao corpo frio, então a temperatura No final do século XIX, os cientistas procuraram estudar o

absoluta do corpo quente deve ser o dobro da temperatura corpo negro nessa situação de equilíbrio.

absoluta do corpo frio.

Outra equação relacionada à radiação de corpo negro é

a chamada Lei de Stefan-Boltzmann. Segundo ela, a taxa

de energia eletromagnética emitida por um corpo negro é

proporcional à quarta potência da sua temperatura absoluta T .

A expressão matemática dessa lei é:

$$P = \sigma \cdot S \cdot T^4$$

A taxa de emissão eletromagnética P é calculada em watt (W). O primeiro fator da equação é a constante de Stefan-

Boltzmann $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$, S é a área da superfície *Figura 4: Uma pequena cavidade é um corpo negro.*

FÍSICA do corpo negro (m^2), e T é a sua temperatura absoluta (K).

Observe que a constante σ Alguns físicos propuseram equações para reproduzir as

é muito pequena. Por isso, o fluxo

de energia eletromagnética emitida (W/m^2) é expressivo 2 curvas de radiação de corpos negros. Na figura 5, os pequenos

círculos representam os pontos obtidos experimentalmente

apenas quando o corpo apresenta temperaturas mais altas,

para a curva de radiação de um corpo negro. As outras curvas

como o carvão em brasa ou as paredes de um forno

aquecido. resultam de equações propostas por cientistas da época.

Você não precisa memorizar as últimas duas equações. Observe que a curva de Wien reproduz bem a curva de

radiação. No entanto, por ser uma lei de natureza empírica,

Nos vestibulares, em geral, essas equações são fornecidas

isto é, por se valer apenas de informações experimentais,

nas questões em que o assunto é explorado.

ela não constitui uma teoria. A outra curva representa a



Lei de Rayleigh-Jeans, que concorda com os resultados



experimentais apenas para os comprimentos de ondas muito



PARA REFLETIR grandes, mas discorda completamente
para comprimentos



de ondas curtos. Ainda assim, essa lei tem o mérito de
ser



Por que uma estrela muito massiva e quente



baseada nos argumentos teóricos da Física Clássica.



tende para a cor azul? O que você pode dizer
sobre a cor de uma estrela mais fria?

dia

A equação de Planck da radiação ra

No final do século XIX, alguns físicos buscavam uma maneira de determinar teoricamente as curvas de radiação Wien

de um corpo negro. Esse corpo é um sistema que absorve

toda a radiação eletromagnética que nele incide. Um objeto, Intensidade da Comprimento de onda pintado de preto fosco e exposto às radiações na faixa do

Figura 5: Leis para reproduzir a curva de radiação de um

visível, é uma boa aproximação de um corpo negro.
corpo negro.

Editora Bernoulli 67

Frente D Módulo 16

Inspirado na Teoria Atômica, o físico alemão Max Planck Essa energia é muito pequena. Vamos convertê-la para

propôs um modelo inteiramente teórico para a radiação do uma unidade mais adequada, o elétron-volt (eV). Como você

corpo negro. Ele supôs que os átomos do corpo negro agem sabe, $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$. Assim:

como pequenos osciladores eletromagnéticos, cada um com $4,0 \times 10^{-19}$ E uma frequência de oscilação própria. São esses osciladores $= 2,5 \text{ eV}$ $1,6 \times 10^{-19}$ que emitem e absorvem a energia eletromagnética em um

corpo negro. Planck os imaginou oscilando com inúmeras Segundo Planck, esse oscilador pode emitir (ou absorver)

frequências, o que explicaria por que a radiação emitida pacotes energéticos de 2,5 eV. De acordo com a transição

de estados, o oscilador pode emitir 2,5 eV (1 pacote), por um corpo negro apresenta as frequências variando de

ou 5,0 eV (2 pacotes) e assim por diante. Todavia, ele não pode zero a infinito.

emitir uma energia, por exemplo, de 4,0 eV, pois esse valor

Em seu modelo, Planck introduziu uma ideia que nada representa 1,6 *quantum*, que é uma quantidade fracionária.

tinha a ver com a Física daquela época. Ele considerou que A ideia da quantização não é um conceito físico novo para

um oscilador não pode ter um valor de energia qualquer, você. A eletricidade é quantizada, pois a carga de qualquer

mas certos valores dados por: corpo eletrizado é um múltiplo inteiro da carga do elétron.

A massa também é quantizada. Por exemplo, a massa de



$E = n \cdot h \cdot f$ um bloco de cobre (admitindo cobre puro) é igual ao número

de átomos de cobre presentes no bloco multiplicado pela

Nessa expressão, f é a frequência do oscilador; h é uma massa de apenas um átomo de cobre.

constante, hoje chamada de constante de Planck, cujo

O conceito de fóton valor é $6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$; e o fator n é um número **inteiro**

positivo conhecido como número quântico, que define o No início do século XX, experiências mostravam que

valor (ou estado) de energia do oscilador. Um oscilador radiações de frequências altas, como um feixe de luz

não irradia (nem absorve) energia enquanto permanece em azul, particularmente, eram capazes de extrair elétrons

um determinado estado. Dessa forma, ele irradia energia quando incidiam sobre metais alcalinos.

Nenhuma

quando passa de um estado para outro. Essa energia não é explicação baseada na Teoria Eletromagnética Clássica

emitida de forma contínua, mas sim de forma quantizada, conseguia esclarecer essa emissão de elétrons, que, mais

isto é, por meio de pulsos ou de pacotes de energia tarde, foi denominada de efeito fotoelétrico. Em 1905,

Albert Einstein explicou o fenômeno, usando como base

dados por:

a teoria da quantização da energia de Planck. Para isso,

Energia emitida = $\Delta n \cdot h \cdot f$ ele considerou que a própria radiação eletromagnética,

emitida por uma fonte, propaga-se pelo espaço concentrada

Em que Δn é a diferença entre o número quântico do estado

em pacotes de energia, denominados de fótons. Esses inicial e do estado final. Por exemplo, quando o oscilador passa

pacotes são, de fato, partículas de massa zero, dotados do estado 5 para o estado 3 ($\Delta n = -2$), a sua energia diminui, de uma energia dada pela equação de Planck,

$$E = h.f.$$

e o oscilador emite radiação. Quando ocorre o contrário, Planck pensava que a quantização da energia era restrita

o oscilador absorve radiação. Quando a transição ocorre aos átomos oscilantes da fonte de radiação. Einstein foi

entre dois níveis de energia adjacentes (por exemplo, além dessa ideia, afirmando que a quantização da energia

entre os níveis 2 e 3, ou 5 e 6), temos $\Delta n = 1$. Nesse caso, também ocorria com a radiação emitida pela fonte. Einstein

a energia irradiada vale: percebeu que a frequência f dos osciladores da fonte é igual

à frequência da radiação emitida. Substituindo f por c/λ

$$E = h.f \quad (c \text{ e } \lambda \text{ são a velocidade e o comprimento de onda da luz) \text{ na}$$

Esse valor corresponde ao pulso de menor energia
equação de Planck, obtemos a seguinte equação
alternativa

possível. Planck o chamou de *quantum* (em latim, *quantum* para calcular a energia de um fóton:

significa quantidade; aqui, devemos pensar em *quantum* $h c \cdot E =$ como uma quantidade mínima e

indivisível). λ

Agora, vamos fazer alguns cálculos para exemplificar
A quantização da energia eletromagnética
desencadeou

a quantização da energia. Considere um oscilador com
uma revolução na Física. Após a sua descoberta,
sucedeu-se

frequência $f = 6,0 \times 10^{14}$ uma corrida desenfreada pela
compreensão do átomo, 14 Hz. De acordo com a
equação de

levando à edificação da Mecânica Quântica nos
primeiros

Planck, a energia de um *quantum* emitida por esse
oscilador

é (lembre-se de que $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$):

$\sim 10^{14}$ 30 anos do século XX. A figura 6 mostra a energia
eletromagnética por fóton estendida para todo o
espectro

$E = h \cdot f = 6,63 \times 10^{-34} \cdot 6,0 \times 10^{14} = 4,0 \times 10^{-19} \text{ J}$
eletromagnético conhecido.

68 Coleção Estudo

Radiação de corpo negro e
quantização da energia

f (Hz) E (J) **Resolução:**

γ A) Nesse experimento, os fótons percorrem distâncias

iguais 3×10^2 m, mas não o fazem com velocidades sempre iguais 2×10^{12} m/s

Ra iguais. No ar, as velocidades são iguais, mas no

vidro 3×10^{18} m/s a velocidade da luz vermelha é maior que a velocidade da luz azul, pois o vidro, que é um meio dispersivo, a velocidade da luz

a luz vermelha possui menor frequência que a azul.

Por isso, o fóton de luz azul sofre um pequeno atraso de tempo ao atravessar o vidro em relação ao

fóton de luz vermelha.

Esse último, portanto, chega

primeiro ao detector. Assim, o pico I corresponde

ao fóton de luz vermelha, e o pico II, ao fóton

de luz azul. Esse resultado está coerente com os resultados experimentais

registros das energias dos dois fótons. Como a luz

de luz azul possui a maior frequência, a energia do fóton associado a ela deve ser maior, de acordo com a

equação de Planck.

B) A energia eletromagnética associada a essa emissão

diófrequência pode ser calculada por: $Ra\ 3 \times 10^6\ 10^2\ 2 \times 10^{-27}$

$$E\ P\ t = J . = 1\ 0 , .10\ s = 10\ J$$

$$o\ 3 \times 10\ s\ 4\ 4^{-29}\ 10\ 2 \times 10$$

Substituindo essa energia na equação de Planck,

obtemos o número N de fótons emitidos:

$$ansmissã\ 3 \times 10^2\ 10^6\ 2 \times 10^{-31}$$

$$Tr\ h\ c .\ de\ eletricidade\ E\ N = \lambda$$

$$\lambda\ 6\ 6\ 10^{-34}\ 8 ,\ x . ,\ 3\ 0\ 10\ x\ (m) \Rightarrow 10 = N . - \text{ FÍSICA}$$

$$5\ 0\ 10 ,\ x\ 7$$

Figura 6: Frequência, comprimento de onda e energia por fóton $\Rightarrow = N\ 25\ 10\ x\ 18\ 8$ fótons do espectro eletromagnético.

Esse número também pode ser expresso como

EXERCÍCIO RESOLVIDO $25 \times 10^9 \times 10^9$

fótons, ou seja, 25 bilhões de bilhões

de fótons são emitidos pelo *laser* a cada 10 s.

02. A figura mostra os trajetos de dois fótons de luz, sendo um

de luz vermelha e o outro de luz azul, que são emitidos

EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO simultaneamente por um *laser*. Os fótons atravessam

uma placa de vidro e atingem um detector muito sensível. **01.** (UFMG) O diagrama apresenta o espectro eletromagnético

Embora os fótons tenham sido disparados ao mesmo tempo, o detector registra a chegada de um primeiro respectivos intervalos de comprimento de onda no vácuo. fóton (I), e depois a chegada do outro (II). Além disso, a energia do segundo fóton (representada pelo pico II na Comprimento de onda (m) tela) é maior que a do primeiro fóton.

10^7 10^5 10^3 10^1 10^{-1} 10^{-3} 10^{-5} 10^{-7} 10^{-9} 10^{-11} 10^{-13} 10^{-15}

Laser Vidro Detector

II Ondas Ondas Infra-Ultra-I Raios X Raios γ longas de rádio vermelho violeta

Luz visível

É **CORRETO** afirmar que, no vácuo,

A) Explicar por que os fótons não chegam simultaneamente ao detector e identificar os picos I e II às luzes A) os raios γ se propagam com maiores velocidades que

vermelha e azul. Explicar também por que as energias as ondas de rádio. registradas são diferentes. B) os raios x têm menor frequência que as ondas longas.

B) Considere agora que o *laser* emita um feixe de luz C) todas as radiações têm a mesma frequência.

azul de potência 1,0 W. Calcular o número de fótons que chegam ao detector durante 10 s. Considere que D) todas as radiações têm a mesma velocidade de o comprimento de onda dessa luz seja $5,0 \times 10^{-7}$ m. propagação.

Editora Bernoulli 69

Frente D Módulo 16

02. (UFRN) A radiação térmica proveniente de uma fornalha **04.** (UNESP–2006) Sabe-se que a energia de um fóton é

de altas temperaturas em equilíbrio térmico, usada proporcional à sua frequência. Também é conhecido

para fusão de materiais, pode ser analisada por um experimentalmente que o comprimento de onda da luz

espectrômetro. A intensidade da radiação emitida vermelha é maior que o comprimento de onda da luz

pela fornalha, a uma determinada temperatura, violeta que, por sua vez, é maior que o comprimento de

onda dos raios X. Adotando a constância da velocidade é registrada por esse aparato em função do comprimento

da luz, pode-se afirmar que de onda da radiação. Daí se obtém a curva espectral

A) a energia do fóton de luz vermelha é maior que a apresentada na figura a seguir.

energia do fóton de luz violeta.

50 B) a energia do fóton de raio X é menor que a energia do fóton de luz violeta.

40 C) as energias são iguais, uma vez que as velocidades $m \cdot \mu$ são iguais. 30 2 W D) as energias dos fótons de luz vermelha e violeta $cm \cdot \mu$ são iguais, pois são parte do espectro visível, e são λ menores que a energia do fóton de raio X. S(10 E) a energia do fóton de raio X é maior que a do fóton

de luz violeta, que é maior que a energia do fóton de

luz
vermelha

0 1 2 3 4 5 6

Comprimento de onda (μm)

05. (CEFET-MG–2009) Em condições normais, o olho humano

A análise desse tipo de espectro levou o físico alemão pode detectar 3 fótons de comprimento de onda igual a

Wilhelm Wien, em 1894, a propor que, quando a $6\ 600\ \text{\AA}$. A energia, em joules, correspondente a esse

intensidade da radiação emitida é máxima, o comprimento número de fótons é igual a

de onda associado obedece à expressão:

Dados: $c = 3,0 \times 10^8\ \text{m/s}$;

$$\lambda \cdot T = 3 \times 10^3\ (\mu m \cdot K)_{(m\acute{a}x.)} \quad h = 6,6 \times 10^{-34}\ \text{J.s};$$

Em que λ é o comprimento de onda do máximo da $_{(m\acute{a}x.)} -10\ 1\ \text{\AA} = 10m$. curva espectral, e T é a temperatura da fornalha para um

determinado espectro. De acordo com essas informações, A) $1 \times 10-$

é **CORRETO** afirmar que a temperatura da fornalha é, B) 3×10^{-19} .

aproximadamente, -19 C) 9×10 .

A) $2\,000\text{ K}$ e que $\lambda_{(\text{máx.})}$ aumenta quando a temperatura D) 3×10^{19} aumenta.

B) $1\,500\text{ K}$ e que λ diminui quando a temperatura $_{(\text{máx.})}$ E) 9×10^{33} diminui.

C) $2\,000\text{ K}$ e que λ diminui quando a temperatura $_{(\text{máx.})}$

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

aumenta.

D) $1\,500\text{ K}$ e que $\lambda_{(\text{máx.})}$ aumenta quando a temperatura

diminui. **01.** (UNIVAS-MG-2008) Sobre as ondas eletromagnéticas

representadas na figura, é **CORRETO** afirmar que

03. (UFRS) “De acordo com a teoria formulada em 1900 pelo Ondas de rádio Micro-ondas Visível Raios X Raios cósmicos físico alemão Max Planck, a matéria emite ou absorve Ondas de TV Infravermelho Ultravioleta Raios gama

energia eletromagnética de maneira _____

emitindo ou absorvendo _____, cuja $10^2\ 10^4\ 10^6\ 10^8\ 10^{10}\ 10^{12}$
 $10^{14}\ 10^{16}\ 10^{18}\ 10^{20}\ 10^{22}\ 10^{24}$

$f\text{ (Hz)}$

energia é proporcional à _____ da radiação

eletromagnética envolvida nessa troca de energia.” A) o comprimento de onda ultravioleta é maior do que

Assinale a alternativa que, pela ordem, preenche B) a velocidade de propagação da luz visível é maior do

CORRETAMENTE as lacunas. que a das micro-ondas.

A) Contínua – *quanta* – amplitude C) as ondas de TV possuem comprimento de onda maior

B) Descontínua – prótons – frequência do que a das ondas de rádio.

D) das ondas representadas, os raios cósmicos possuem

C) Descontínua – fótons – frequência

maior velocidade no vácuo.

D) Contínua – elétrons – intensidade E) a energia do infravermelho é maior do que das ondas

E) Contínua – nêutrons – amplitude de TV.

70 Coleção Estudo

Radiação de corpo negro e quantização da energia

02. (UFMG) As ondas eletromagnéticas, ao contrário das **04.** (Unimontes-MG–2009) Considere as seguintes situações:

ondas mecânicas, não precisam de um meio material I. Elétrons de condução movimentam-se num fio

para se propagar. Considere as seguintes ondas: som, condutor, no qual foi estabelecida uma corrente

ultrassom, ondas de rádio, micro-ondas e luz. Sobre essas contínua de grande valor.

ondas é **CORRETO** afirmar que II. Elétrons em movimento circular uniforme, no interior

A) luz e micro-ondas são ondas eletromagnéticas e as de um acelerador de partículas.

outras são ondas mecânicas. III. Elétrons em movimento, a partir do repouso, numa

região onde existe um campo elétrico uniforme,

B) luz é onda eletromagnética e as outras são ondas

de grande intensidade.

mecânicas.

Os elétrons estarão emitindo radiação eletromagnética

C) som é onda mecânica e as outras são ondas nas situações descritas em

eletromagnéticas.

A) I e III, apenas.

D) som e ultrassom são ondas mecânicas e as outras B) I e II, apenas.

são ondas eletromagnéticas.

C) II e III, apenas.

03. D) I, II e III. (UEL-PR) Alguns semicondutores emissores de luz,

mais conhecidos como LEDs, estão sendo

introduzidos **05.** (PUC Minas-2009) O controle remoto de um aparelho

na sinalização de trânsito das principais cidades do

de TV envia pulsos de radiação eletromagnética para um

mundo. Isto se deve ao tempo de vida muito maior receptor na TV.

Essa comunicação entre o controle remoto

e ao baixo consumo de energia elétrica dos LEDs em e o televisor ilustra que essa radiação

comparação com as lâmpadas incandescentes, que

A) somente se propaga através do ar.

têm sido utilizadas para esse fim. A luz emitida por

B) possui energia inversamente proporcional à sua

um semicondutor é proveniente de um processo físico, frequência.

onde um elétron excitado para a banda de condução

C) difrata e acelera no ar. **FÍSICA**

do semicondutor decai para a banda de valência,

D) é uma onda eletromagnética.

emitindo um fóton de energia $E = h\nu$. Nesta relação,

h é a constante de Planck, ν é a frequência da luz

06. (Unioeste-PR-2006) Sobre a Teoria Quântica, é **CORRETO**

emitida ($\nu = c/\lambda$, onde c é a velocidade da luz e λ o

afirmar
que

seu comprimento de onda), e E equivale à diferença

em energia entre o fundo da banda de condução e o 01. o termo *quanta* é sinônimo de *quark*, ambos

representando subpartículas da estrutura do átomo.

topo da banda de valência, conhecida como energia de

gap do semicondutor. Com base nessas informações 02. a emissão ou absorção de radiação pelo átomo é

e no conhecimento sobre o espectro eletromagnético, realizada em “pacotes” de energia denominados

é **CORRETO** afirmar: *quanta*.

04. a energia dos *quanta* pode ser calculada por $E = h \cdot f$,

A) A energia de *gap* de um semicondutor será tanto

onde E é a energia, h é a constante de Planck e f é a

maior quanto maior for o comprimento de onda da frequência da radiação. luz emitida por ele.

08. a quantização da energia tem origem nos trabalhos do

B) Para que um semicondutor emita luz verde, ele deve físico alemão Max Planck, por volta do ano de 1900.

ter uma energia de *gap* maior que um semicondutor

16. o *quantum* proposto por Planck confirmou a teoria

que emite luz vermelha.

clássica de que a energia é uma espécie de fluido,

C) O semicondutor que emite luz vermelha tem uma que passa continuamente de um átomo para outro

energia de *gap* cujo valor é intermediário às energias durante as interações.

de *gap* dos semicondutores que emitem luz verde e 32. o *spin* e o *quantum* possuem conceitos semelhantes,

amarela. ambos representando a rotação do elétron em torno

D) A energia de *gap* de um semicondutor será tanto de seu eixo.

menor quanto menor for o comprimento de onda da 64. com base na hipótese dos *quanta*, Albert Einstein

luz emitida por ele. elaborou, em 1905, uma nova teoria para a luz,

E) O semicondutor emissor de luz amarela tem energia considerando-a como um fluxo de corpúsculos

de *gap* menor que o semicondutor emissor de luz chamados fótons. vermelha. Soma ()

Editora Bernoulli 71

Frente D Módulo 16

07. (EFOA-MG–2006) A energia de um fóton de uma onda Sabe-se que a fonte I emite N_I fótons por segundo, cada

eletromagnética de frequência f é dada pela equação um com energia E_I e que a fonte II emite N_{II} fótons por

$E = hf$, onde h é a constante de Planck. Sabe-se segundo, cada um com energia E_{II} . Considerando-se essas

informações, é **CORRETO** afirmar que

também que a capacidade de penetração de uma onda

eletromagnética aumenta com a energia do fóton. A) $N_I < N_{II}$ e $E_I = E_{II}$

O diagrama a seguir ilustra a localização relativa, B) $N_I < N_{II}$ e $E_I < E_{II}$

no espectro eletromagnético, de algumas das radiações C) $N_I = N_{II}$ e $E_I < E_{II}$.

conhecidas.

D)
 N_I
 $=$
 N_{II}
 e
 E_I
 $=$

gama Raios X Visível Raios Ultra- Infra- Micro-Ondas de

violeta vermelho ondas rádio **10.** (Unioeste-PR-2007) A irradiação de alimentos é um

processo de esterilização usado para melhorar a

Comprimento de Onda

qualidade de frutas frescas, grãos e vegetais, prevenindo

É **CORRETO** afirmar que o brotamento, retardando a maturação e aumentando o

A) as ondas de rádio têm maior capacidade de penetração tempo de conservação dos alimentos. Este processo consiste

em submetê-los a pequenas doses de radiação, por um que os raios X porque possuem maior frequência.

tempo determinado. As radiações comumente utilizadas

B) os raios gama têm maior capacidade de penetração são raios gama, raios X e feixe de elétrons. Sabe-se

que a radiação ultravioleta porque possuem menor que a frequência da radiação gama é maior do que a

frequência. frequência dos raios X. Sejam (V_G , E_G , L_G) e (V_X , E_X , L_X)

C) a radiação visível tem menor capacidade de as velocidades (V), as energias (E) e os comprimentos de

penetração que a radiação de micro-ondas porque onda (L) dos fótons da radiação gama e da radiação X,

possui menor frequência. respectivamente, é **CORRETO** afirmar que

D) a radiação infravermelha tem menor capacidade A) $V = V$; $E > E$; $L > L$. $X > X$ $G > G$ $X > X$ $G > G$

de penetração que os raios X porque tem menor B) $V_X = V_G$; $E_X < E_G$; $L_X > L_G$. frequência.

C) $V \neq V$; $E < E$; $L > L$. $\times G \times G \times G$

E) a radiação visível tem maior capacidade de penetração

que a radiação ultravioleta porque tem menor D) $V_X \neq V_G$; $E_X < E_G$; $L_X < L_G$.

frequência. E) $V \neq V$; $E > E$; $L < L$. $\times G \times G \times G$

08. (URCA-CE-2007) Sendo $h = 6,63 \times 10^{-34}$ J.s a constante de **11.** (UFCG-PB-2006) Em 1887, H. Hertz produziu, pela

Planck e $c = 3,00 \times 10^8$ m/s a velocidade da luz (no vácuo), primeira vez em laboratório, ondas eletromagnéticas

então um *quantum* de raios X de comprimento de onda teoricamente previstas por Maxwell, em 1864. A figura

igual a $\lambda = 3,0 \times 10^{-10}$ m possui uma energia igual a a seguir mostra um desenho de parte do equipamento

utilizado: o emissor e o receptor das ondas. Duas esferas

A) 2,0 J.

metálicas eram ligadas a uma fonte de tensão variável,

B) 3,3 J. constituindo o emissor (à esquerda da figura). O dispositivo

C) $6,63 \times 10^{-16}$ J. que permitia a detecção das ondas eletromagnéticas era

constituído de uma pequena esfera, montada em frente

D) 6,62 J.

a um parafuso pontiagudo pelo qual se podia ajustar a

E) 2,24 J. distância entre ela e sua ponta (à direita na figura).

09. (UFMG–2009) Um estudante de Física adquiriu duas fontes de luz *laser* com as seguintes especificações para a luz emitida:

Fonte I	Fonte II
Potência 0,005 W	0,030 W
Comprimento de onda 632 nm	632 nm

72 Coleção Estudo

Radiação de corpo negro e quantização da energia

Considerando o experimento realizado, pode-se afirmar **14.** (UFG–2006) Uma fonte luminosa puntiforme de 157 W

que a(s) emite luz de comprimento de onda 660 nm. A luz é emitida

A) cargas elétricas aceleradas entre as esferas do em todas as direções, formando frentes de onda esféricas

emissor produziam campos elétricos e magnéticos com centro na fonte. **CALCULE** o número de fótons que

independentes do tempo que induziam correntes atravessam, em 1 segundo, uma superfície de área igual

elétricas nos condutores do receptor, provocando uma a 1 cm², localizada a 1 metro da fonte.

descarga elétrica entre a pequena esfera e o parafuso.

Dados: $h = 6,6 \times 10^{-34}$ J.s;

B) ondas eletromagnéticas eram produzidas por uma $c = 3,0 \times 10^8$ m/s;

corrente contínua entre as esferas do emissor. $\pi = 3,14$.

C) corrente elétrica que se estabelecia, entre a pequena

esfera e o parafuso do receptor, não variava com o tempo. **15.** (UFMG / Adaptado) Em um tipo de tubo de raios X,

elétrons acelerados por uma diferença de potencial de

D) ondas eletromagnéticas produzidas pelas cargas

$2,0 \times 10^4$ V atingem um alvo de metal, onde são

aceleradas no emissor induziam correntes elétricas

violentamente desacelerados. Ao atingir o metal, toda a variáveis no receptor com as mesmas frequências

energia cinética dos elétrons é transformada em raios X. com que foram emitidas.

A) **CALCULE** a energia cinética que um elétron adquire

E) ondas eletromagnéticas produzidas pelas cargas

ao ser acelerado pela diferença de potencial.

aceleradas no emissor induziam correntes elétricas

B) **CALCULE** o menor comprimento de onda possível

variáveis no receptor, porém com frequências muito

maiores com que foram emitidas. (λ) para os raios X produzidos por esse tubo. mín

C) **EXPLIQUE** por que ocorre emissão de raios X com

12. (UFRGS) Os raios X são produzidos em tubos de vácuo, comprimentos de ondas variáveis de $\lambda_{\text{mín}}$ até $\lambda \rightarrow \infty$.

nos quais elétrons são submetidos a uma rápida

desaceleração ao colidir contra um alvo metálico. Os raios X

SEÇÃO ENEM

consistem em um feixe de **FÍSICA**

A) elétrons.

B) fótons. **01.** (Enem–2010) Ao contrário dos rádios comuns (AM ou FM),

C) prótons. em que uma única antena transmissora é capaz

D) nêutrons. de alcançar toda a cidade, os celulares necessitam

E) pósitrons. de várias antenas para cobrir um vasto território. No caso

dos rádios FM, a frequência de transmissão está na faixa

13. dos MHz (ondas de rádio), enquanto, para os celulares, (UFMS–2007) A área médica faz grande uso das radiações

ionizantes para tratamento de tumores. Dependendo a frequência está na casa dos GHz (micro-ondas). Quando

comparado aos rádios comuns, o alcance de um celular

da conduta de tratamento desses tumores, utilizam-se

é muito menor.

radiações de naturezas e energias diferentes como raios X

e raios gama. Com relação a essas radiações, é **CORRETO**

Considerando-se as informações do texto, o fator que

afirmar: possibilita essa diferença entre a propagação das ondas

de rádio e as de micro-ondas é que as ondas de rádio são

01. Os raios X podem ser produzidos por colisão de

elétrons em um alvo. A) facilmente absorvidas na camada da
atmosfera

superior conhecida como ionosfera.

02. A radiação gama é uma radiação eletromagnética

proveniente do núcleo do átomo. B) capazes de contornar uma
diversidade de obstáculos

como árvores, edifícios e pequenas elevações.

04. Os raios X são uma radiação eletromagnética

C) mais refratadas pela atmosfera terrestre, que

proveniente das transições dos elétrons entre as

apresenta maior índice de refração para as ondas

camadas eletrônicas do átomo.

de rádio.

08. Os raios X são uma radiação eletromagnética menos

D) menos atenuadas por interferência, pois o número
energética que a radiação ultravioleta.

de aparelhos que utilizam ondas de rádio é menor.

16. Os raios X são emitidos somente quando o núcleo do

E) constituídas por pequenos comprimentos de onda
átomo que lhe deu origem estiver instável.

que lhes conferem um alto poder de penetração

Frente D Módulo 16

02. (Enem–2009) O progresso da tecnologia introduziu
Considerando-se o gráfico, é correto afirmar que a perturbação

diversos artefatos geradores de campos eletromagnéticos. por ondas
de rádio geradas em uma explosão solar

Uma das mais empregadas invenções nessa área são os A) dura mais
que uma tempestade magnética.

telefones celulares e *smartphones*. As tecnologias de

B) chega à Terra dez dias antes do plasma solar.

transmissão de celular atualmente em uso no Brasil

contemplam dois sistemas. O primeiro deles é operado C) chega à
Terra depois da perturbação por raios X.

entre as frequências de 800 MHz e 900 MHz e constitui D) tem
duração maior que a da perturbação por raios X.

os chamados sistemas TDMA/CDMA. Já a tecnologia GSM, E) tem
duração semelhante à da chegada à Terra de

ocupa a frequência de 1 800 MHz. partículas de alta energia.

Considerando que a intensidade de transmissão e o nível

de recepção “celular” sejam os mesmos para as tecnologias

de transmissão TDMA/CDMA ou

GSM, se um engenheiro

GABARITO

tiver de escolher entre as duas tecnologias para obter a

mesma cobertura, levando em
consideração apenas o Fixação número
de antenas em uma região, ele deverá escolher

A) a tecnologia GSM, pois é a que opera com ondas de 01. D
maior comprimento de onda. 02. C

B) a tecnologia TDMA/CDMA, pois é a que apresenta 03. C
efeito Doppler mais pronunciado.

04.
E

C) a tecnologia GSM, pois é a que utiliza ondas que se
propagam com maior velocidade.

05.
C

D) qualquer uma das duas, pois as diferenças nas

Propostos

frequências são compensadas pelas diferenças nos

01. E 08. C

comprimentos de onda.

02. D 09. A

E) qualquer uma das duas, pois nesse caso as

intensidades decaem igualmente da mesma forma 03. B 10.
B

independentemente da frequência. 04. C 11. D

03. 05. D 12. B (Enem–2007) Explosões solares emitem radiações

eletromagnéticas muito intensas e ejetam, para o espaço, 06. Soma
= 78 13. Soma = 3

partículas carregadas de alta energia, o que provoca 07. D 14. $4,2 \times 10^{15}$ fótons

efeitos danosos na Terra. O gráfico a seguir mostra o 15. A) $3,2 \times 10^{-15}$ J

tempo transcorrido desde a primeira detecção de uma γ B) $6,2 \times 10$ m (Caso em que o elétron perde

explosão solar até a chegada dos diferentes tipos de toda sua energia na primeira colisão interna).

perturbação e seus respectivos efeitos na Terra.

C) A maioria dos elétrons incidentes perde

Escala de tempo das perturbações solares e seus efeitos energia aos poucos, chegando ao repouso

Perturbação após múltiplas colisões. Em cada uma dessas

Raios X Efeito: primeiras alterações colisões, a energia perdida corresponde a na ionosfera

Ondas Perturbação maiores que fótons de comprimentos de ondas específicos

de rádio Efeito: Interferência de rádio $\lambda_{\min}$, já que a energia dissipada é

menor que a energia total do elétron. Assim,

Pe de alta ionosfera polar valores baixíssimos, os comprimentos de energia rturbação Partículas Perturbação Efeito: alteração na como a energia dissipada pode assumir

Perturbação onda podem variar de $\lambda_{\min}$ até $\lambda \rightarrow \infty$.

Plasma Efeito: tempestade magnética solar **Seção Enem**

1 minuto 10 minutos 1 hora 10 horas 1 dia 10 dias 01. B 02. E 03.
D

Disponível em: (Adaptação).

74 Coleção Estudo

FÍSICA MÓDULO FRENTE Dualidade onda-partícula e 17 D efeito fotoelétrico

Max Planck, em 1900, explicou a distribuição de
Alguns atingem a placa oposta B, e uma corrente
elétrica é

radiação eletromagnética emitida pelos corpos negros,
registrada no galvanômetro G. O número de elétrons
emitidos

supondo que os átomos desse corpo oscilassem apenas

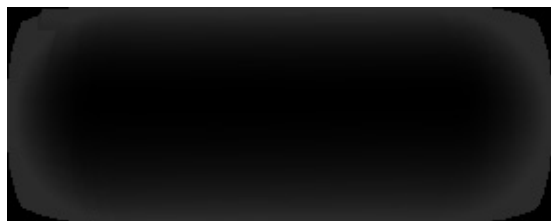
em A e que atingem B pode ser aumentado ou diminuído

com determinados valores de energia, múltiplos de variando-se a diferença de potencial (V_{AB}) entre A e B. um valor elementar. Em outras palavras, a energia Isso é feito através do ajuste da posição do cursor sobre a

dos átomos seria quantizada. A princípio, o estudo de resistência divisora de tensão do experimento. Planck despertou pouco interesse, até que, em 1905,

analisando um fenômeno que ficou conhecido como efeito

fotoelétrico, Albert Einstein percebeu que a própria radiação Campânula Luz incidente eletromagnética é quantizada. Em sua teoria, Einstein de vidro acolheu a ideia de que a luz possuía um comportamento



uma minúscula entidade desprovida de massa era a Elétrons – ejetados dual, ora agindo como onda, ora como partícula. Assim, – portadora da energia elementar da luz e de todas as outras A B – radiações eletromagnéticas, tendo sido chamada de fóton. Vácuo

Em 1913, Niels Bohr usou o fóton para explicar os espectros

descontínuos do gás hidrogênio. O que se assistiu nos anos V Cursor seguintes foi a um espetacular avanço da Física Quântica e a uma compreensão, cada vez maior, do mundo atômico.

Neste módulo, estudaremos o efeito fotoelétrico,
Bateria

– +

o comportamento dual da luz e os espectros
descontínuos

dos gases. Veremos que a teoria de Einstein para o

Figura 1: Montagem para estudar o efeito fotoelétrico. efeito
fotoelétrico vai muito além da simples explicação

A figura 2 mostra o gráfico da corrente elétrica I
registrada

desse fenômeno. Ao mostrar que a energia luminosa é
quantizada, e que o fóton deve ser visto como uma
onda- no galvanômetro em função da tensão V . Como
a placa B_{AB}

é conectada ao circuito no lado do polo positivo da
bateria,

partícula, Einstein criou uma agenda de trabalho entre
os

os elétrons emitidos em A são atraídos para B. Para
valores

físicos, que, paulatinamente, elucidaram e previram
vários de V suficientemente elevados, todos os
elétrons emitidos _{AB}

comportamentos dos átomos. A Física Quântica
tornou-se

por A são coletados em B , e a corrente atinge um valor
de

a base para o estudo do núcleo atômico e das
moléculas, saturação. Depois disso, um aumento extra
em V não afeta _{AB}

proporcionando muitos avanços tecnológicos. O *laser*,
os circuitos transistorizados e o microscópio eletrônico
são Observe também que I é a corrente de saturação
para uma a mais o valor da corrente, como pode ser
observado no gráfico.

apenas alguns dos incontáveis exemplos da inserção
da luz de intensidade alta, enquanto I é a corrente de
saturação _b Física Quântica entre nós. para a luz
(mesma frequência) de intensidade baixa.

Corrente

A QUANTIZAÇÃO DA LUZ _{Luz de alta}
intensidade I_a

O efeito fotoelétrico _{Luz de baixa}

intensidade I_b

Em 1887, Hertz descobriu o efeito fotoelétrico.

Ele notou que a incidência de luz sobre um metal podia,

sob certas circunstâncias, produzir a emissão de elétrons

a partir dessa superfície. Em 1900, Lenard realizou uma série de experiências sobre o efeito fotoelétrico, usando o Tensão V_{AB} aparelho mostrado na figura 1. Observe que a luz incidente *Figura 2: Voltagem aplicada entre a placa emissora A e a placa*

sobre a placa metálica A provoca a emissão de elétrons. *coletora B em função da corrente.*

Editora Bernoulli 75

Frente D Módulo 17

Se a polaridade da bateria for invertida (nesse caso, dada pela equação de Planck, $E = h.f$. Enquanto Planck

$V < 0$), a placa B passará a repelir os elétrons emitidos por A. pensava que a quantização da energia era restrita aos AB

Observe que, para pequenos valores de V , a corrente não osciladores nas paredes do corpo negro, Einstein dizia AB

cai imediatamente a zero, pois os elétrons são emitidos com que a quantização da energia era uma propriedade da

certa energia cinética. Para valores mais elevados de V , luz. Portanto, a frequência f dos osciladores é também a_{AB}

a corrente diminui, anulando-se quando $V = V_0$, valor frequência da própria luz emitida pelo corpo. Assim, como $a_{AB} = 0$

conhecido como potencial de corte ou de frenagem. Nesse citado anteriormente, podemos substituir f pela razão

ponto, a corrente é zero porque os elétrons de máxima entre a velocidade da luz c e o seu comprimento de onda λ

energia cinética emitidos pela placa A atingem o repouso e usar a seguinte equação para calcular a energia do fóton:

exatamente quando chegam à placa B. Pelo Princípio de

Conservação da Energia, o valor dessa energia cinética pode $E_{hc} =$

λ

ser calculado multiplicando-se o potencial V pela carga do e

elétron (e). Assim, temos: A interpretação quântica do efeito fotoelétrico se ajustou

a todas as características do fenômeno discutidas no

(1) último tópico. Vejamos como o conceito do fóton explica $m v^2 = e V$.
|| 2 ||₀)_{m x á} a independência da energia cinética dos elétrons em

relação à intensidade da luz. De acordo com Einstein,

Alguns elétrons emitidos apresentam uma energia cinética um elétron ejetado de uma superfície metálica exposta

um pouco menor que esse valor porque sofrem colisões à luz recebe a energia de um único fóton. Assim, quando

internas ao tentar escapar do metal. o número de fótons incidentes sobre a placa aumenta,

Observe novamente o gráfico (figura 2) e veja que o em um dado intervalo de tempo, o número de fótons que

potencial de corte V interage com os elétrons também cresce, e o número é o mesmo tanto para a luz de alta

quanto para a luz de baixa intensidade. Isso significa, de elétrons ejetados aumenta. Porém, como cada fóton

de acordo com a equação anterior, que a energia cinética permanece com a mesma energia hf , cada elétron também

máxima dos elétrons independe da intensidade da luz. Esse continua recebendo essa mesma energia. É por

isso que a

resultado é surpreendente. De acordo com a Física Clássica, energia cinética de ejeção (e o potencial de frenagem V_0)

o aumento na intensidade da luz deveria elevar a energia não depende da intensidade da luz. A figura 3 é uma

absorvida pelos elétrons, e isso deveria aumentar a energia visualização desse fato. Observe que a placa metálica é

cinética máxima dos elétrons emitidos. iluminada por luzes de mesma frequência, mas o feixe da

esquerda tem menor intensidade que o feixe da direita.

A seguir, apresentamos as duas principais características

A luz mais intensa (note a maior aglomeração de fótons) gera

do efeito fotoelétrico observadas por Lenard:

uma maior taxa de emissão de elétrons. Observe, ainda, que

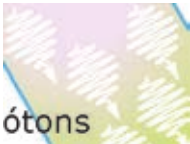
1. O aumento na intensidade da luz eleva a taxa de os vetores velocidade dos elétrons são iguais nos dois casos.

emissão de elétrons, mas a energia cinética destes

2. Elétrons de Cada metal emite elétrons a partir de uma frequência permanece imutável.



mínima, além da qual o aumento da frequência da velocidade v velocidade v



luz faz crescer a energia cinética dos elétrons.
Fótons Fótons



Veremos, agora, a explicação dada por Einstein para o



efeito fotoelétrico.

A interpretação quântica do efeito

fotoelétrico *(de mesmas frequências) terem intensidades diferentes.*

Agora, vamos discutir a dependência da energia cinética

Em 1905, inspirado pela teoria de Planck, Albert Einstein do elétron com a frequência da luz. Quando um fóton

explicou o efeito fotoelétrico por meio da suposição de incide sobre uma superfície metálica, uma parcela da

que a própria luz viajava no espaço concentrada em sua energia hf é usada para arrancar um elétron. Essa

pacotes de energia, os fótons. Segundo Einstein, o fóton parcela depende do tipo de metal, e é chamada de

é uma partícula com massa zero, dotado de uma energia trabalho de extração (ou função trabalho) W . O restante

$(hf - W)$ é a energia cinética de ejeção do elétron (isso se Embora o fóton seja uma partícula um tanto diferente

ele não sofrer colisões internas). Por exemplo, quando daquela imaginada por Newton, o seu conceito conduz a

uma luz amarela com fótons de energia $E = hf = 2,2$ eV uma Teoria Corpuscular para a luz. Atualmente, os físicos

incide sobre uma placa de césio ($W = 1,8$ eV), a energia admitem um comportamento dual para a luz e para as

cinética máxima de emissão de cada elétron vale 0,4 eV. outras ondas eletromagnéticas. Sob certas circunstâncias,

Para uma frequência maior, digamos, luz azul com fótons a luz se comporta como uma onda (interferência, difração,

de 2,5 eV, a energia cinética aumenta para 0,7 eV. etc.), sob outras, ela comporta-se como uma partícula

Naturalmente, para cada metal existe uma frequência (efeito fotoelétrico, emissão de radiação dos corpos

mínima, chamada de frequência de corte f , em que a negros, etc.). A figura 4 é interessante, pois ilustra o

energia do fóton é exatamente igual ao trabalho de extração. o comportamento dual da luz em duas situações que

Nesse caso, o fóton possui energia suficiente apenas

para ocorrerem sucessivamente. Primeiro, um feixe de luz refrata

arrancar o elétron. Para o cézio, a frequência de corte vale: e dispersa ao passar por um prisma (comportamento

$f = 1,816 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$ (ondulatório). A seguir, o feixe monocromático selecionado

com $f_0 = 6,63 \times 10^{14} \text{ Hz}$ produz a emissão de elétrons ao incidir sobre a placa

metálica (comportamento corpuscular).

Essa é a frequência da luz vermelha no início do espectro

visível. Metais alcalinos, como o cézio, apresentam baixa

Refração e dispersão

eletronegatividade e pequenos valores de W e f_0 da luz branca



A dualidade onda-partícula Coletor



Após a publicação do trabalho de Einstein sobre o
Bateria +



efeito fotoelétrico, experiências realizadas em laboratório –

confirmaram a teoria do fóton (veja o Exercício Resolvido 01). **FÍSICA**

Fóton Elétron A

Além desse efeito, outros fenômenos de partículas foram

Amperímetro

explicados usando-se o conceito de fóton. Todavia, essa Placa metálica

teoria parece entrar em conflito direto com a teoria

Figura 4: Comportamento ondulatório (dispersão) e corpuscular

ondulatória da luz, que também foi comprovada através (efeito fotoelétrico) da luz, presentes nesse experimento. de muitas experiências. A seguir, apresentamos uma breve

discussão sobre essa questão. A natureza é simétrica: existem as cargas positivas

e as negativas, o frio e o quente, etc. Pensando assim,

Durante muitos anos, Isaac Newton e Christian Huygens

em 1924, o francês Louis de Broglie argumentou que,

protagonizaram um dos mais longos e empolgantes debates

se a luz comporta-se ora como onda, ora como partícula,

da história da Física. Newton defendia a ideia de que a luz

talvez o mesmo acontecesse com a matéria, em particular,

era constituída por partículas (Teoria Corpuscular), enquanto

com partículas como o elétron. Louis de Broglie previu

Huygens acreditava que ela era um tipo de onda (Teoria

que o comprimento de onda de uma partícula material

Ondulatória). No início do século XIX, várias experiências

é dado por:

com a luz mostravam que ela sofria interferência e outros

fenômenos perfeitamente explicados do ponto de vista da $h \lambda = m v$. Teoria Ondulatória. Na segunda metade do século XIX,

Maxwell descobriu que a luz era uma onda eletromagnética.

Nessa expressão, h é a constante de Planck, m é a

Diante de tantas evidências, a teoria ondulatória da luz

massa e v é a velocidade da partícula. Segundo essa teoria,

passou a ser aceita por todos.

um feixe de elétrons de baixa energia, cujo comprimento de

A interpretação de Einstein sobre o efeito fotoelétrico onda obtido por essa equação é comparável ao comprimento

reacendeu, de certa forma, as ideias de Newton sobre o de onda dos raios X, deveria sofrer difração perceptível

comportamento corpuscular da luz. Conforme discutimos no ao atravessar a rede cristalina de um material de prova.

item anterior, a emissão de elétrons de uma superfície metálica Em 1928, os físicos americanos Davisson e Germer realizaram

exposta à luz é causada pela interação entre as partículas uma experiência que comprovou tal fato. Eles dirigiram um

constituintes da luz (os fótons) e os elétrons da superfície. feixe de elétrons sobre um cristal de níquel e observaram que,

Frente D Módulo 17

em vez de uma difusão geral (prevista pela teoria clássica), **Resolução:**

apareciam certas concentrações de elétrons, desviados

A) De acordo com a teoria de Einstein, a energia cinética

ordenadamente (difratados) em direções definidas pelos máximos de ejeção dos elétrons é igual à diferença

planos do cristal. Além disso, essas direções variavam com λ entre a energia E que o fóton fornece ao elétron e

velocidade dos elétrons incidentes, conforme previa a teoria o trabalho de extração W gasto em sua remoção.

O valor da energia do fóton pode ser calculado por

de de Broglie. A montagem e a foto mostradas na figura 5

meio do produto entre a constante de Planck h e a

ilustram a experiência para produzir a difração de elétrons. frequência f da luz. Assim, a expressão da energia

cinética máxima $E_{Cmáx}$ é:



$$E_{\text{Cmáx}} = h \cdot f - W$$

Padrão de difração

Essa equação indica que a $E_{\text{Cmáx}}$ varia linearmente com f . Por isso, o gráfico da E em função de f é $E_{\text{Cmáx}}$

uma
reta.

B) De acordo com a equação utilizada no item anterior, Cristal o coeficiente angular da reta (inclinação) é a constante de Planck h . Usando alguns dados do gráfico,



obtem

Feixe de elétrons com $3 \times 10^{-15} \text{ h} = 42 \times 10 \text{ eV s}$. diferentes velocidades $(1,16439 \times 10^{14})$

Figura 5: Montagem e imagem da difração de elétrons. -19 o valor anterior pelo fator $1,6 \times 10$ Para converter **h** para a unidade **J.s**, basta multiplicar J/eV, e teremos:

$$h = 6,7 \times 10^{-34} \text{ J/s}$$

EXERCÍCIO RESOLVIDO C) O valor $f_{140} = 4,39 \times 10 \text{ Hz}$ é a frequência de corte.

Os fótons de luz com tal frequência apresentam

energia suficiente apenas para remover os elétrons.

01. Como não há excedente de energia, o elétron não O físico americano Robert Millikan realizou uma série

de experiências para comprovar a teoria do fóton é ejetado. Abaixo da frequência f_0 , não há energia

fotônica para remoção de elétrons.

proposta por Einstein para explicar o efeito fotoelétrico.

D) De acordo com a equação obtida no item (A),

Os resultados dos experimentos foram absolutamente

o trabalho de extração W é o coeficiente linear da

concordantes com a teoria. O gráfico a seguir é baseado

reta (valor da ordenada em que a reta corta o eixo

nos dados publicados por Millikan em 1916. Nele, vertical). Como o gráfico está interrompido entre

a ordenada é a energia cinética máxima dos elétrons a origem e a frequência de corte, a obtenção de

ejetados por uma placa metálica exposta a luzes de W diretamente a partir do gráfico é mais difícil.

Substituindo frequências diferentes, enquanto a abscissa representa $E = 0$ e $f = f_0$ na equação da reta,

as frequências dessas luzes, podemos obter o valor de W mais facilmente. Assim:

$$0 = h \cdot f_0 - W \Rightarrow W = 4,2 \times 10^{-15} \cdot 4,39 \times 10^{14} = 1,8 \text{ eV}$$

3 A ESTRUTURA ATÔMICA

Espectros descontínuos dos gases

De acordo com o modelo de Planck para a radiação

dos elétrons (eV) de corpo negro, sabe-se que os sólidos emitem radiação

Energia cinética máxima eletromagnética em todos os comprimentos de onda.

4 Por isso, a radiação emitida por um sólido forma $\frac{6}{10} \frac{8}{12}$

Frequência da luz (10 Hz)

14 um espectro contínuo. Em contraste com os sólidos,

os espectros de gases são descontínuos. Por exemplo, uma

A) Explicar por que esse gráfico é uma reta. lâmpada de vapor de sódio emite uma luz amarela ao se

produzir uma descarga elétrica nesse vapor. Assim, quando

B) Explicar o significado físico da inclinação dessa reta

essa luz passa por um prisma, como mostrado na figura 6,

e calcular o seu valor.

■
ela produz uma única linha sobre o anteparo (se a fenda

■
C) Explicar o significado físico da frequência f_0 indicada fosse mais estreita, a imagem no anteparo seria mais nítida,

■
no gráfico. e observaríamos que esta é, na verdade, composta de duas

■
D) Calcular o trabalho de extração da placa metálica. linhas muito próximas).

■
78 Coleção Estudo









Dualidade onda-partícula e efeito

fotoelétrico

Na sequência, veremos que o átomo de Thomson
mostrou-se

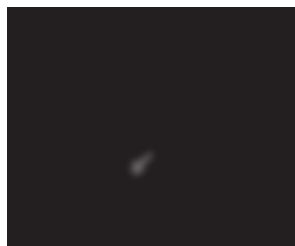
Anteparo

Lâmpada de falho com respeito à distribuição da carga
positiva. Ainda

vapor de sódio Fenda assim, esse modelo tem o mérito de
ser a primeira ideia



sobre a arquitetura atômica.



Prisma O núcleo atômico

Em 1911, o físico neozelandês Ernest Rutherford (com a preciosa ajuda de dois estudantes, Marsden e Geiger)

Figura 6: Espectro descontínuo do vapor de sódio.

realizou uma experiência que revelou uma inconsistência no

Planck explicou com sucesso as curvas de radiação dos modelo de Thomson. Segundo esse modelo, a carga positiva

sólidos utilizando a revolucionária teoria da quantização. do átomo acha-se diluída em toda extensão de sua massa.

Na sequência, veremos como os físicos conseguiram A carga negativa, representada pelos elétrons, também está

explicar a radiação descontínua dos gases usando a

ideia diluída na esfera atômica. Então, Rutherford argumentou



da quantização da energia. que, se essa teoria estivesse correta, uma fina lâmina



A descoberta do elétron

metálica seria facilmente perfurada pelo bombardeio



de partículas carregadas. Para confirmar suas ideias,



Em 1897, Joseph John Thomson descobriu a existência do elétron. Thomson montou o aparato mostrado na figura 8,



elétron, uma minúscula partícula dotada de carga elétrica constituído por uma fonte de partículas α (carga positiva), negativa, presente em todo tipo de matéria. Por meio de uma fina lâmina de ouro e um detector sensível a impactos



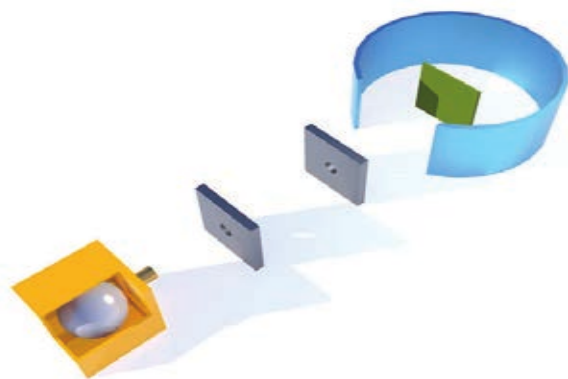
dispositivo muito engenhoso, Thomson conseguiu determinar de partículas. Esse último é um invólucro revestido

o valor da razão entre a massa e a carga do elétron. A ideia internamente com sulfeto de zinco, substância que

de que a matéria é feita de átomos já era um consenso entre apresenta fluorescência ao ser atingida por partículas de

os cientistas. Além disso, era sabido que a matéria possuía alta velocidade, como as partículas α do experimento.

dois tipos de carga elétrica, a positiva e a negativa, e que, Lâmina de ouro Poucas **FÍSICA** em seu estado normal (neutro), a carga total da matéria é nula. Muitas Ocasionais partículas Então, Thomson sugeriu que o átomo fosse uma esfera Lâminas de chumbo maciça de carga positiva, recheada de elétrons. A soma com um orifício central das cargas negativas dos elétrons anularia, dessa forma, a



carga positiva da esfera. A figura 7 mostra um esquema do



átomo de Thomson. Caixa de Tela fluorescente

Elétrons chumbo



– Partículas alfa



positiva Fonte de partículas – – Massa – – Emissões

– alfa, como polônio –

– *Figura 8: Experimento de Rutherford.*

– Como dissemos, caso o modelo de Thomson estivesse – –

correto, seria esperado que as partículas α
atravessassem

Figura 7: No modelo de Thomson, os elétrons incrustados na a lâmina de ouro, seguindo a direção do feixe incidente

massa positiva vibram e emitem radiação.

(a carga negativa estaria uniformemente distribuída

Para explicar por que os gases emitem radiação pelo átomo, ocorreriam apenas pequenos desvios das eletromagnética com alguns comprimentos de ondas

partículas α). Realmente, a maioria dos pontos cintilantes presentes no espectro e outros não, Thomson imaginou que sobre o detector indicou essa trajetória. Porém, alguns pontos

cada elétron oscilasse em torno de sua posição de equilíbrio. apareceram um pouco deslocados para os lados. De fato,

Segundo o eletromagnetismo clássico, as cargas irradiam para surpresa de Rutherford, apareceram pontos cintilantes

energia quando são aceleradas. Assim, admitindo que um em toda a extensão do detector. Ocasionalmente, alguns

elétron apresentasse uma frequência de oscilação própria, pontos cintilantes apareciam próximos à entrada do feixe,

a energia proveniente dele produziria uma linha em uma como mostra a figura. Consta que Rutherford disse: “É como

determinada posição sobre o anteparo usado na produção se eu lançasse uma bala de canhão em uma folha de papel,

do espectro do gás. e a recebesse de volta”.

Diante das evidências, Rutherford sugeriu que a carga positiva do átomo deveria estar concentrada em uma região muito pequena, o núcleo atômico. Esse núcleo apresentaria o centro do átomo para o elétron passar de um estado de energia (associado à sua órbita em

positiva do átomo deveria estar concentrada em uma região passar de um estado de energia (associado à sua órbita em

muito pequena, o núcleo atômico. Esse núcleo apresentaria o centro do átomo para o elétron passar de um estado de energia (associado à sua órbita em Bohr para o átomo

uma gigantesca densidade de carga elétrica positiva, de hidrogênio é baseado em três postulados. De acordo

explicando os grandes (e ocasionais) desvios sofridos com o 1º Postulado, o átomo de hidrogênio emite um fóton

quando o elétron passa de um estado de maior energia pelas partículas α . Ele sugeriu, ainda, que os elétrons

para outro de menor energia, e absorve um fóton quando o

estivessem girando em torno do núcleo, submetidos a uma

elétron passa de um estado de menor energia para outro de

força centrípeta de origem elétrica, como está ilustrado

maior energia. A frequência do fóton emitido, ou absorvido,

na figura 9.

é dada
por:

$$f = \frac{\Delta E}{h}$$

Em que

ΔE é a
diferença
de
energia
entre
os dois
estados
e h é a
constante
de
Planck.

Núcleo

Elétron De acordo com o 2º Postulado, o elétron gira em
torno

do núcleo em uma órbita circular, de modo que a
força

centrípeta que atua sobre ele é igual à força de atração

elétrica
exercida
pelo
núcleo:

Figura 9: No modelo de Rutherford, os elétrons movem-se em
em $m v^2 / K e^2 = r$ = círculos em torno de um núcleo positivo. r^2

A emissão de radiação e os espectros descontínuos
dos Na equação anterior, m , e , v e r são a massa, a
carga,

gases poderiam estar associados às acelerações centrípetas a velocidade e o raio orbital do elétron, respectivamente.

dos elétrons em órbita em torno do núcleo, como sugere A constante K , que vale $9,0 \times 10^9 \text{ N/m}^2\text{C}^2$, é a constante a figura 9? De fato, não. A ideia dos elétrons irradiando eletrostática do vácuo.

energia eletromagnética é inconsistente, pois essa irradiação O 3º Postulado introduz o caráter quântico ao átomo. Para

implicaria uma perda de energia. O elétron tenderia, portanto, quantizar a energia do elétron, Bohr percebeu que precisava

a perder velocidade e a cair no núcleo. Para isso não ocorrer, quantizar os valores de r . Para isso, ele propôs esse postulado

isto é, para o elétron emitir energia e ainda assim manter na seguinte forma: uma órbita estável, ele precisaria receber um aporte externo

de energia. Em átomos isolados, como é o caso da matéria $h m v r n = n = 1, 2, 3, \dots 2 \pi$ ordinária, isso não acontece.

Nessa expressão, o produto $m v r$ é denominado de
momento

Embora o modelo de Rutherford não tenha se mostrado angular do elétron. O fator n é o número

quântico – número

adequado para explicar a emissão de radiação pelos átomos, inteiro positivo associado às órbitas permitidas do elétron.

a descoberta do núcleo atômico foi um grande avanço na O número quântico $n = 1$ está associado à órbita mais

compreensão da estrutura da matéria. A seguir, veremos a próxima do núcleo, $n = 2$ está associado à segunda órbita

interpretação quântica (e correta) dada por Bohr a respeito mais próxima do núcleo, e assim por diante. Combinando as

da emissão da radiação atômica. duas expressões anteriores, Bohr chegou às expressões para

calcular o raio orbital e a energia do elétron. A expressão

O modelo de Bohr para o átomo de para o raio orbital é:

hidrogênio $r = 0,53n^2$ (em angstrom)_n

O angstrom é uma unidade adequada para medir distâncias

Em 1913, Niels Bohr usou as ideias de Planck, Einstein₋₁₀ atômicas ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$). Na expressão anterior, fazendo

e Rutherford para desenvolver um modelo atômico para o $n = 1$, obtemos o raio da primeira órbita permitida, que é

átomo de hidrogênio. Assim como ocorre com os osciladores $r = 0,53 \text{ \AA}$. Fazendo $n = 2$, obtemos o raio $r = 0,53 \cdot 2^2 \text{ \AA}$, de Planck, Bohr imaginou que o átomo de hidrogênio também fazendo $n = 3$, obtemos $r = 0,53 \cdot 3^2 \text{ \AA}$, e assim por diante.³ possui certos estados estacionários de energia, nos quais Note que, como r é proporcional a n^2 , as órbitas externas ele não emite e nem absorve radiação eletromagnética. são muito mais espaçadas do que as órbitas internas.

80 Coleção Estudo

Dualidade onda-partícula e efeito fotoelétrico

A energia total do elétron é composta de duas parcelas, a diferença entre as energias E_3 e E_1 também vale $12,09 \text{ eV}$ ₃₁

uma associada ao movimento do elétron, que é a parcela (faça as contas para verificar esse valor). No estado 3,

relativa à energia cinética E_c , e a outra associada à posição o elétron acha-se excitado. Por isso, a tendência é que e

do elétron, que é a parcela relativa à energia potencial

ele retorne ao estado fundamental. O elétron pode fazê-lo

elétrica E . Bohr mostrou que a energia cinética aumenta saltando diretamente de volta para o nível 1, ou fazendo p

quando o elétron gira em órbitas mais próximas do núcleo, um primeiro salto para o nível 2, seguido de outro salto

enquanto a energia potencial aumenta quando as órbitas são para o nível 1. Em cada uma dessas transições, a energia

mais externas. Bohr também mostrou que a soma dessas do elétron diminui, e um fóton de radiação é emitido. Um

energias é dada por: caso de emissão fotônica é mostrado na figura 10, em que

E_1 um elétron excitado passa do nível 4 para o nível 2. Observe $E_4 - E_2 = -13,6$ (em elétron-volt) $\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2}$ que o fóton emitido tem energia igual a 2,55 eV, que é

Ao contrário do raio atômico, as energias tornam-se exatamente a diferença entre as energias dos níveis 4 e 2.

cada vez mais próximas entre si à medida que o elétron

Um elétron ligado ao átomo não pode absorver (ou

passa para órbitas mais externas. Isso pode ser explicado

emitir) fótons com qualquer valor de energia. Por matematicamente pela equação da energia, na qual o exemplo, um elétron no estado fundamental é capaz de quadrado do número quântico aparece no denominador.

absorver um fóton de energia de 10,2 eV, mas não um. Esse comportamento está ilustrado na figura 10, fóton de 8 eV. No primeiro caso, a absorção é possível que é um diagrama dos níveis de energia do átomo de porque a energia do fóton somada à energia do elétron hidrogênio. Normalmente, o elétron ocupa o nível mais baixo

no estado fundamental resulta na energia do nível de energia (estado fundamental), em que $n = 1$, $r = 0,53 \text{ \AA}$ e E_1

$E = -13,6 \text{ eV}$. A energia mais alta vale zero, correspondendo a $n = 2$ ($10,2 - 13,6 = -3,40 \text{ eV}$). Na outra situação, essa soma

é $-5,6 \text{ eV}$. Como não existe um nível estacionário com essa

a n (e também r) $\rightarrow \infty$. Nesse caso, o elétron está

desligado

energia, o fóton de 8 eV passa pelo átomo de hidrogênio

do átomo. Medições realizadas em laboratório indicam que a

sem interagir com o elétron. Um caso diferente ocorre energia de ionização do átomo hidrogênio vale 13,6 eV, valor **FÍSICA**

quando fótons com qualquer energia maior que 13,6 eV

que concorda com a energia de ligação do elétron para $n = 1$.

incidem sobre átomos de hidrogênio. Nesse caso, todos

$n = \infty$ 0 os fótons são absorvidos, e os elétrons são desligados

$n = 4$ -0,85 eV de seus átomos. Como a energia necessária para $n = 3$ -1,51 eV

Emissão remover o elétron é de apenas 13,6 eV, o restante

$n = 2$ 2,55 eV da energia é usado para ejetar o elétron do átomo.

-3,40 eV

A figura 10 mostra um fóton de energia 15 eV removendo

um elétron do estado fundamental. Este é ejetado do átomo

com a energia excedente de 1,4 eV. Fenômeno semelhante

Ionização Absorção a esse ocorre no efeito fotoelétrico.

15 eV 12,09 eV O porquê dos espectros

descontínuos dos gases

O modelo de Bohr permitiu explicar quantitativamente os

Estado fundamental espectros descontínuos do hidrogênio. Embora esse modelo

$n = 1$ -13,6 eV não possa ser aplicado para calcular as raias espectrais

Figura 10: Níveis de energia do átomo de hidrogênio e os de outros gases, a ideia qualitativa de níveis quânticos de processos de emissão e absorção de radiação. energia pode ser aplicada para todos os átomos e moléculas.

Para passar a um nível mais energético, o elétron deve Usando esse conceito, poderemos entender por que os

absorver um fóton de energia exatamente igual à

diferença espectros dos gases são descontínuos.

entre a energia do nível de destino e aquela do nível de A figura 11 mostra três tipos de espectros. O primeiro é

origem. Na figura 10, note que um fóton de 12,09 eV é um espectro contínuo da luz emitida pelo filamento de uma

absorvido pelo elétron, que passa do estado fundamental para lâmpada. Nesse caso, existem elétrons excitados em vários

o terceiro nível. Essa transição eletrônica foi possível porque níveis de energia pertencentes a órbitas mais externas.

Editora Bernoulli 81

Frente D Módulo 17

Além disso, nos sólidos, os átomos são próximos. Por isso, Esse fato é conhecido como o princípio da correspondência.

as transições eletrônicas ocorrem entre níveis de energia O Exercício Resolvido 02, apresentado a seguir, aborda esse

de um mesmo átomo, mas também entre níveis de átomos importante aspecto da Teoria Quântica. Antes de vê-lo,

vizinhos. Dessa forma, os fótons emitidos apresentam uma procure responder à seguinte pergunta:

infinidade de energias (e de frequências) e o espectro gerado

é contínuo.

PARA REFLETIR

Sólido Prisma de

quente dispersão Espectro contínuo O elemento hélio foi primeiro descoberto no

Sol, e somente depois na Terra (*hélios*, em grego, quer dizer Sol). Você imagina como

essa descoberta foi feita?

Gás quente Espectro descontínuo de emissão

EXERCÍCIO RESOLVIDO

Gás frio Espectro descontínuo de absorção

02. De acordo com o Eletromagnetismo clássico, a frequência

da luz emitida por um átomo é igual à frequência de

Figura 11: Espectro contínuo e espectros descontínuos de rotação do elétron. A Física Quântica prevê que a

emissão e absorção. frequência da luz emitida é a razão entre a diferença de

O segundo espectro mostrado na figura 11 é um espectro energia dos níveis de transição e a constante de Planck.

descontínuo de emissão, gerado pela luz proveniente de Calcular a frequência de rotação do elétron no átomo de

um gás aquecido (ou submetido a uma descarga elétrica). hidrogênio para a segunda órbita ($n = 2$) e a frequência

Nesse caso, alguns elétrons acham-se excitados em níveis da luz emitida para uma transição do nível 2 para o nível 1

energéticos mais externos. Como os átomos dos gases são usando o modelo de Bohr. Repetir os cálculos para a



afastados uns dos outros, os elétrons excitados efetuam centésima órbita ($n = 100$) e para a transição $100 \rightarrow 99$.



transições dentro de seu próprio átomo. As transições Em cada caso, calcular o erro cometido ao se usar a Física



eletrônicas são limitadas, e os fótons emitidos apresentam Clássica e comentar os resultados.



certos valores de energia. Por isso, o espectro dessa radiação *Resolução*: é descontínuo. As linhas que vemos no espectro foram



Primeiro, vamos deduzir uma expressão para calcular a



produzidas pelas luzes constituídas por esses fótons.



frequência f de rotação do elétron em uma órbita circular



O último espectro mostrado na figura 11 é um espectro de de raio r . Ela pode ser obtida igualando-se a expressão

absorção. Uma lâmpada incide luz de todas as frequências da força centrípeta que atua sobre o elétron com a

sobre o mesmo tipo de gás usado no espectro de emissão. expressão da força elétrica, dada pela Lei de Coulomb,

Fótons de determinadas frequências são absorvidos por e substituindo-se a velocidade por $2\pi r f'$. Efetuando

elétrons que ocupam níveis mais internos de energia algumas manipulações, obtemos: dos átomos do gás. Os demais fótons atravessam o gás

e produzem um espectro em que faltam as luzes que e $K f' = \frac{1}{2} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m r}$ foram absorvidas pelo gás. As linhas negras no espectro

representam essas ausências. Note que as linhas sobre Substituindo o valor da carga elétrica, da massa do elétron

o espectro de emissão acham-se nas mesmas posições ($e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ e $m = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$) e da constante

das linhas negras do espectro de absorção. O espectro

de eletrostática do vácuo $K_{920} = 9,0 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}$, obtemos:
absorção é uma espécie de negativo do espectro de emissão.

Concluimos aqui a explanação sobre a Teoria Quântica. $f_1' = 2,53 \times 10^{14} \text{ Hz}$

r

Aprendemos que os fenômenos atômicos, em geral,

não podem ser descritos satisfatoriamente pela Física o raio, em metros, é dado por $r = 0,53 \times 10^{-10} \text{ m}$. Para

Clássica. Contudo, quando o número quântico é muito $n = 2$, temos $r = 2,12 \times 10^{-10} \text{ m}$. Utilizando esse valor,

grande, a Física Quântica se reduz à Física Clássica. obtemos $f' = 8,2 \times 10^{14} \text{ Hz}$.

82 Coleção Estudo

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
710
711
712
713
714
715
716
717
718
719
720
721
722
723
724
725
726
727
728
729
730
731
732
733
734
735
736
737
738
739
740
741
742
743
744
745
746
747
748
749
750
751
752
753
754
755
756
757
758
759
760
761
762
763
764
765
766
767
768
769
770
771
772
773
774
775
776
777
778
779
780
781
782
783
784
785
786
787
788
789
790
791
792
793
794
795
796
797
798
799
800
801
802
803
804
805
806
807
808
809
810
811
812
813
814
815
816
817
818
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
840
841
842
843
844
845
846
847
848
849
850
851
852
853
854
855
856
857
858
859
860
861
862
863
864
865
866
867
868
869
870
871
872
873
874
875
876
877
878
879
880
881
882
883
884
885
886
887
888
889
890
891
892
893
894
895
896
897
898
899
900
901
902
903
904
905
906
907
908
909
910
911
912
913
914
915
916
917
918
919
920
921
922
923
924
925
926
927
928
929
930
931
932
933
934
935
936
937
938
939
940
941
942
943
944
945
946
947
948
949
950
951
952
953
954
955
956
957
958
959
960
961
962
963
964
965
966
967
968
969
970
971
972
973
974
975
976
977
978
979
980
981
982
983
984
985
986
987
988
989
990
991
992
993
994
995
996
997
998
999
1000

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

31

32

33

34

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
710
711
712
713
714
715
716
717
718
719
720
721
722
723
724
725
726
727
728
729
730
731
732
733
734
735
736
737
738
739
740
741
742
743
744
745
746
747
748
749
750
751
752
753
754
755
756
757
758
759
760
761
762
763
764
765
766
767
768
769
770
771
772
773
774
775
776
777
778
779
780
781
782
783
784
785
786
787
788
789
790
791
792
793
794
795
796
797
798
799
800
801
802
803
804
805
806
807
808
809
810
811
812
813
814
815
816
817
818
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
840
841
842
843
844
845
846
847
848
849
850
851
852
853
854
855
856
857
858
859
860
861
862
863
864
865
866
867
868
869
870
871
872
873
874
875
876
877
878
879
880
881
882
883
884
885
886
887
888
889
890
891
892
893
894
895
896
897
898
899
900
901
902
903
904
905
906
907
908
909
910
911
912
913
914
915
916
917
918
919
920
921
922
923
924
925
926
927
928
929
930
931
932
933
934
935
936
937
938
939
940
941
942
943
944
945
946
947
948
949
950
951
952
953
954
955
956
957
958
959
960
961
962
963
964
965
966
967
968
969
970
971
972
973
974
975
976
977
978
979
980
981
982
983
984
985
986
987
988
989
990
991
992
993
994
995
996
997
998
999
1000

2

2

2

2

2

2

2

2

2

2

2

2

2

2

2

2

2

2

2

2

2

2

2

2

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

■

■

■

■

■

■

■

■



■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

31

32

33

34

81

82

83

84

85

86

87

88

89

90

91

92

93

94

95

96

97

98

99

100

101

102

103

104

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

31

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

31

32

33

34

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

■

■

I

II

I

-

.

I

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

■

•

•

■

•

•

■

•

■

•

•

■

•

•

•

•

•

•

•

■

■

■

•

■

■

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

•

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

31

32

33

34

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
710
711
712
713
714
715
716
717
718
719
720
721
722
723
724
725
726
727
728
729
730
731
732
733
734
735
736
737
738
739
740
741
742
743
744
745
746
747
748
749
750
751
752
753
754
755
756
757
758
759
760
761
762
763
764
765
766
767
768
769
770
771
772
773
774
775
776
777
778
779
780
781
782
783
784
785
786
787
788
789
790
791
792
793
794
795
796
797
798
799
800
801
802
803
804
805
806
807
808
809
810
811
812
813
814
815
816
817
818
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
840
84



Dualidade onda-partícula e efeito fotoelétrico

Agora, calcularemos a frequência da luz prevista pela **02.** (UFJF-MG-2010) Fótons de raios X, com energias da

Teoria Quântica (de Bohr) para a transição $2 \rightarrow 1$. ordem de $1,98 \times 10^{-15}$ J, são utilizados em experimentos

Esse valor é dado por: de difração com cristais. Nesses experimentos,

$E_2 - E_1$, λ , d , = o espaçamento entre átomos do cristal é da ordem do $2,4 \times 10^{-10}$ m comprimento de onda dos raios X. Em 1924, Louis de

$$h \cdot \nu = E_2 - E_1$$

Broglie apresentou a teoria de que a matéria possuía tanto

Nessa equação, o numerador é a diferença entre as características corpusculares como ondulatórias. A teoria

módulos das energias dos níveis 1 e 2 (fornecidas em eV de Louis de Broglie foi comprovada por um experimento

na figura 10), e o denominador é a constante de Planck de difração com cristais, utilizando-se um feixe de elétrons

na unidade eV.s. O erro entre a frequência calculada no lugar de um feixe de raios X. Considere a constante de

classicamente ($8,2 \times 10$ Plack $h = 6,60 \times 10^{-34}$ J/s; a velocidade da luz no vácuo 14 Hz) e o valor anterior é grande

(66%). Isso era esperado, pois os números quânticos $c = 3,0 \times 10^8$ m/s; a massa do elétron $m = 9,10 \times 10^{-31}$ kg

1 e 2 são pequenos, e a Física Clássica discorda da Física e $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19}$ J.

Quântica nessas situações. A) **CALCULE** o valor do espaçamento entre os átomos do

Para $n = 100$, o raio é $r = 5\,300 \times 10$ cristal, supondo que o valor do espaçamento é igual $_{-10}$ m. Esse raio

atômico é muito grande, e a Física Clássica deve gerar ao comprimento de onda dos raios X com energia de

resultados mais próximos da Física Quântica. Nesse caso, $1,98 \times 10^{-15}$ J.

a frequência f' vale $6,6 \times 10^9$ Hz. Para obter a frequência B) **CALCULE** o valor da quantidade de movimento dos

quântica, precisamos usar $E = -13,6/n^2$ para calcular as elétrons utilizados no experimento de difração com

energias dos níveis 100 e 99. Substituindo esses números o cristal, cujo espaçamento entre os átomos foi

na equação, encontramos: determinado no item anterior. Despreze os efeitos

$$E = -1,36 \times 10 \text{ eV} \text{ e } E = -1,39 \times 10^{-3} \text{ eV}_{100}$$

$_{-3}$ relativísticos no movimento dos elétrons. 99

C) **CALCULE** o valor aproximado da energia cinética dos

Calculando a diferença entre essas energias e dividindo-a elétrons, em elétrons-volts, neste experimento.

pela constante de Planck, obtemos $f = 7,2 \times 10^9$ Hz para

a luz emitida na transição $100 \rightarrow 99$. Como
esperado, **03.** (UFC–2007) No início do século XX, novas teorias
FÍSICA

o erro de f' em relação a f tornou-se menor (8%). provocaram uma surpreendente revolução conceitual

Para $n = 10$ mil, o raio atômico vale 2,3 mm. Nesse caso, na Física. Um exemplo interessante dessas novas

o “átomo” é tão grande que a Física Clássica prevê com ideias está associado às teorias sobre a estrutura da

bastante precisão o seu comportamento. matéria, mais especificamente àquelas que descrevem a

estrutura dos átomos. Dois modelos atômicos propostos

EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO nos primeiros
anos do século XX foram o de Thomson

e o de Rutherford. Sobre esses modelos, assinale a

alternativa **CORRETA**.

01. (UFMS–2007) O efeito fotoelétrico consiste na emissão A) No modelo de Thomson, os elétrons estão localizados

de elétrons pela matéria sob a ação de fótons (luz). em uma pequena região central do átomo, denominada

Os elétrons emitidos possuem variadas energias, sendo núcleo, e estão cercados por uma carga positiva,

os mais energéticos aqueles que estavam menos ligados de igual

intensidade, que está distribuída em torno

ao material. Considerando um feixe de luz coerente

do núcleo.

(única frequência), incidindo sobre a superfície de um

material, e que esteja produzindo o efeito fotoelétrico, B) No modelo de Rutherford, os elétrons são localizados

é **CORRETO** afirmar: em uma pequena região central do átomo e estão

01. A energia máxima com a qual os elétrons são emitidos cercados por uma carga positiva, de igual intensidade,

não depende da frequência do feixe de luz incidente. que está distribuída em torno do núcleo.

02. Quanto maior a intensidade do feixe de luz incidente, C) No modelo de Thomson, a carga positiva do átomo

maior a taxa de emissão de elétrons. encontra-se uniformemente distribuída em um volume

04. A energia de um feixe de luz não depende do esférico, ao passo que os elétrons estão localizados

comprimento de onda da luz. na superfície da esfera de carga positiva.

08. A emissão de elétrons é explicada pela teoria D) No modelo de Rutherford, os elétrons movem-se em

ondulatória da luz. torno da carga positiva, que está localizada em uma

16. Os elétrons são emitidos porque absorvem energia pequena região central do átomo, denominada núcleo.

dos fótons durante a colisão.

E) O modelo de Thomson e o modelo de Rutherford

Soma () consideram a quantização da energia.

Frente D Módulo 17

04. (UFG–2006) Transições eletrônicas, em que fótons são

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

absorvidos ou emitidos, são responsáveis por muitas

das cores que percebemos. Na figura a seguir, vê-se

01. (UDESC–2008) Foi determinado experimentalmente que,

parte do diagrama de energias do átomo de hidrogênio. quando se incide luz sobre uma superfície metálica, essa

superfície emite elétrons. Esse fenômeno é conhecido

eV como efeito fotoelétrico e foi explicado em 1905 por Albert

Einstein, que ganhou em 1921 o Prêmio Nobel de Física,

–1,5 E₃ em decorrência desse trabalho. Durante a realização

dos experimentos desenvolvidos para compreender esse

efeito, foi observado que

–3,4 E₂ 1. os elétrons eram emitidos imediatamente. Não havia

atraso de tempo entre a incidência da luz e a emissão

dos
elétrons

2. quando se aumentava a intensidade da luz incidente,

-13,6 eV sua energia cinética. o número de elétrons emitidos aumentava, mas não

Na transição indicada ($E \rightarrow E_3$), um fóton de energia 3. a energia cinética do elétron emitido é dada pela

2 a equação $E = mv^2/2 = hf - W$, em que o termo hf é a

A) 1,9 eV é emitido. energia cedida ao elétron pela luz, sendo h a constante

de Planck e f a frequência da luz incidente. O termo W é

B) 1,9 eV é absorvido.

a energia que o elétron tem de adquirir para poder sair

C) 4,9 eV é emitido. do material, e é chamado função trabalho do metal.

D) 4,9 eV é absorvido. Considere as seguintes afirmativas:

E) 3,4 eV é emitido. I. Os elétrons com energia cinética zero adquiriram

energia suficiente para serem arrancados do metal.

05. II. Assim como a intensidade da luz incidente não influencia (UFMG) O átomo de hidrogênio é composto por

um próton e um elétron. No estado fundamental, a energia dos elétrons emitidos, a frequência da luz

incidente também não modifica a energia dos elétrons.

a energia de ligação entre eles é de -13,60 eV. A energia

III. O metal precisa ser aquecido por um certo tempo,

de ligação do primeiro estado excitado é -3,40 eV, e a do

para que ocorra o efeito fotoelétrico.

segundo é -1,50 eV, conforme representado na figura A.

Considere que o elétron esteja no segundo estado excitado.

Para decair para o estado fundamental, ele emitirá A) Somente a afirmativa II é verdadeira.

fótons. A figura B representa linhas de espectro de B) Todas as afirmativas são verdadeiras.

emissão do átomo de hidrogênio, com os respectivos C) Somente as afirmativas I e II são verdadeiras.

valores de energia indicados. Quais linhas podem D) Somente a afirmativa III é verdadeira.

aparecer nesse decaimento? E) Somente a afirmativa I é verdadeira.

-1,50 eV 02. (UFRN-2008) Quando há incidência de radiação $-3,40 \text{ eV}$ eletromagnética sobre uma superfície metálica, elétrons

$-13,60 \text{ eV}$ podem ser arrancados dessa superfície e eventualmente produzir uma corrente elétrica. Esse fenômeno pode

Figura A

ser aplicado na construção de dispositivos eletrônicos, tais como os que servem para abrir e fechar portas

automáticas. Ao interagir com a superfície metálica, $E(\text{eV})$

Figura B a radiação eletromagnética incidente se comporta como

A) onda, e o fenômeno descrito é chamado de efeito

A) Somente as linhas com energia $12,10 \text{ eV}$, $10,20 \text{ eV}$

B) partícula, e o fenômeno descrito é chamado de efeito

- B) Somente a linha com energia 12,10 eV fotoelétrico.
- C) Com exceção da linha de 12,75 eV, todas as demais C) partícula, é o fenômeno descrito é chamado de efeito
termiô
- D) Somente a linha com energia 12,75 eV
- D) onda, e o fenômeno descrito é chamado de efeito
- E) Somente as linhas com energia 10,20 eV e 1,90 eV termiônico.

84 Coleção Estudo

Dualidade onda-partícula e efeito fotoelétrico

03. (UFPE–2007) O efeito fotoelétrico, explicado por Albert **06.**
(Unifor-CE–2007) Um elétron, no primeiro estado

Einstein em 1905, constitui um dos marcos iniciais no quântico do átomo de hidrogênio, possui velocidade igual

desenvolvimento da Física Quântica. Assinale, dentre as a $2,0 \times 10^6$ m/s. A massa do elétron é $9,1 \times 10^{-31}$ kg,

alternativas a seguir, a **ÚNICA** característica observada e a constante de Planck é $6,6 \times 10^{-34}$ J.s. O comprimento

no efeito fotoelétrico que está de acordo com a previsão de onda de de Broglie desse elétron, em metros, vale

da Física Clássica, quando fotoelétrons são emitidos a A) 2×10^{-59} .

partir do cátodo. B) $2,4 \times 10^{-16}$.

A) A existência de uma frequência de corte da radiação C) $3,6 \times 10^{-$

incidente. D) $2,4 \times 10^{-8}$.

B) O crescimento da corrente fotoelétrica com a E) $1,2 \times 10^{-6}$.

frequência da radiação incidente.

07. (UEL-PR-2007) Atualmente, sabe-se que as partículas

C) A ausência de intervalo de tempo apreciável entre a

que compõem a matéria formadora do Universo podem

incidência de radiação no cátodo e o estabelecimento

ter comportamentos de natureza tanto corpuscular como

da corrente fotoelétrica.

ondulatória. O fato de não observarmos diretamente a

D) O crescimento da corrente fotoelétrica com a natureza
ondulatória em objetos materiais macroscópicos,

intensidade da radiação incidente. como em uma bola de bilhar de
aproximadamente 50 g,

possuindo velocidade igual a 5,0 m/s, deve-se

E) A dependência da energia cinética dos fotoelétrons

com a frequência da radiação incidente. Dado: $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s} = 4,14 \times 10^{-15} \text{ eV.s}$.

A) à razão de não ter sido inventado um aparelho óptico que

04 identifique diretamente essa característica da matéria. . (UDESC-2006) Uma radiação ultravioleta, de comprimento

de onda igual a $2,50 \times 10^{-7} \text{ m}$ B) ao fato de o comprimento de onda
associado, que $\sim 10^{-7} \text{ m}$, incide na superfície de um

metal, fazendo com que sejam ejetados elétrons dessa tem o valor
de $2,65 \times 10^{-33} \text{ m}$, ser pequeno para

FÍSICA

superfície. Sendo a energia cinética máxima desses uma detecção,
mesmo com aparelhos de medida que

elétrons igual a 0,800 eV, qual o valor da função trabalho alcancem a ordem de grandeza no nível subatômico.

desse metal? C) à massa da bola, pois tem um valor muito grande para

Constante de Planck = $6,4 \times 10^{-34} \text{ J.s} = 4,0 \times 10^{-15} \text{ eV.s}$ ser possível a demonstração do caráter ondulatório.

D) a uma falha dos postulados de Louis de Broglie e

A) 6,50 eV na experiência de Davisson-Germer na medida de

B) 5,60 eV comprimento de onda da bola de bilhar.

C) 4,80 eV E) aos centros difratores (orifícios, fendas ou átomos)

utilizados para medir a frequência da onda associada

D) 4,00 eV à bola, de valor $1,89 \times 10^{-19} \text{ J}$, estarem localizados

E) 3,50 eV incorretamente nos equipamentos de detecção.

05. (U F G – 2 0 0 6) L e v a n d o e m c o n t a a d u a l i d a d e

08. (UFT–2007) Em um átomo, o primeiro nível, ocupado

onda-partícula da luz, qual dos fenômenos a seguir por um elétron, tem energia $E_1 = -2,6 \times 10^{-19} \text{ J}$ e o

caracteriza a sua natureza corpuscular? segundo, desocupado, tem energia $E_2 = -1,3 \times 10^{-19} \text{ J}$.

A) A polarização da luz ao atravessar um polaroide. Ao ser iluminado com luz monocromática, de determinada

frequência, esse átomo absorve um fóton e, com isso,

B) A difração da luz ao atravessar uma fenda estreita.

o elétron passa do primeiro nível para o segundo.

C) O efeito fotoelétrico da luz ao incidir em uma superfície. Sabe-se que a constante de Planck é de $6,6 \times 10^{-34} \text{ J.s}$.

metálica. Considerando-se essas informações, é **CORRETO** afirmar

D) A interferência da luz após passar por fendas paralelas que, na situação descrita, a frequência da luz incidente

e estreitas. no átomo é de, aproximadamente,

E) O deslocamento para o vermelho do espectro óptico A) $1 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$. C) $3 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$.

das estrelas distantes. B) $2 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$. D) $4 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$.

Editora Bernoulli **85**

Frente D Módulo 17

09. (UFRN–2008) No início do século XX, foram propostos **11.** (Unioeste-PR–2006) Existem vários modelos para explicar

dois modelos atômicos da matéria segundo os quais o o comportamento dos átomos. O modelo de Bohr é o mais

átomo era constituído de um pequeno núcleo formado simples para explicar algumas propriedades do átomo de

por cargas positivas e, em torno desse núcleo, orbitavam hidrogênio. No modelo de Bohr do átomo de hidrogênio,

os elétrons. O modelo de Rutherford (1911) baseava-se um elétron ($q = -e$) circunda um próton ($q = +e$) em uma

em experimentos de espalhamento de partículas alfa órbita de raio R. Qual a velocidade do elétron nessa órbita?

desviadas pelos núcleos atômicos, enquanto o modelo Considere K como a constante da Lei de Coulomb e m a

massa
do
elétron.

de Bohr (1913), que procurava superar as limitações do modelo anterior, explicava o espectro de linhas de emissão K

A)
2e

do átomo de hidrogênio supondo que os elétrons podiam mR realizar transições entre as órbitas eletrônicas.

2K

B)
e

Em relação a um dos modelos anteriormente citados, mR

pode-se afirmar também: C) K

e

A) O modelo de Bohr explicava a estabilidade das órbitas mR

eletrônicas do átomo a partir da quantização do eK D)
momento angular. mR

B) O modelo de Bohr mostrava a instabilidade das órbitas e K E)
eletrônicas do átomo a partir dos experimentos de mR

espalhamento de partículas alfa.

C) O modelo de Rutherford explicava a instabilidade das **12.**
(UEM-PR-2007) A respeito do raio *laser*, assinale a

alternativ
CORRET

órbitas eletrônicas do átomo a partir da quantização

da energia. A) É obtido pela desintegração do núcleo da

substância

radioativa que é utilizada na fabricação do *laser*.

D) O modelo de Rutherford mostrava a estabilidade das B) A luz do *laser* é praticamente policromática, pois

órbitas eletrônicas do átomo a partir de experimentos é constituída de radiações que apresentam várias

de espalhamento de partículas alfa. frequências.

C) É uma onda eletromagnética que corresponde às mais

10. (Unimontes-MG–2007) Em 1913, apenas dois anos após as altas frequências na faixa dos raios X.

após o físico inglês Ernest Rutherford ter mostrado D) A luz do Sol é um *laser*.

que o átomo possuía um núcleo, o grande físico E) É uma amplificação da luz por emissão estimulada de

dinamarquês Niels Bohr propôs um modelo para a radiação.

átomo de hidrogênio que não apenas levava em conta

a existência das linhas espectrais, mas predizia seus

13. (UFMG–2007) No efeito fotoelétrico, um fóton de energia E_f

é absorvido por um elétron da superfície de um metal.

comprimentos de onda com uma precisão em torno de

0,02%. Os postulados que Bohr introduziu para seu Sabe-se que uma parte da energia do fóton, E_{m}

é utilizada para remover o elétron da superfície do

modelo são:

metal e que a parte restante, E_c , corresponde à energia

1. Um átomo pode existir, sem irradiar energia, em cinética

adquirida pelo elétron, ou seja, $E_f = E_m + E_c$.

qualquer um de um conjunto discreto de estados de E_m
1916, Millikan mediu a energia cinética dos elétrons que

energia estacionários; são ejetados quando uma superfície
de sódio metálico é

iluminada com luz de diferentes frequências. Os resultados

2. Um átomo pode emitir ou absorver radiação apenas obtidos por
ele estão mostrados no gráfico.

durante transições entre esses estados estacionários.

A frequência da radiação e, conseqüentemente, da linha -19
0 J) espectral correspondente é dada por $h \cdot f_{4,8} = E - E$ (h
é if i f

a constante de Planck, cujo valor é $4,14 \times 10^{-15} \text{ eV.s}$).

Um átomo absorve um fóton de frequência $6,2 \times 10^{14} \text{ Hz}$.

Com base no modelo de Bohr, a energia do átomo 1,6

aumenta de, aproximadamente,

A) 6,0 eV. C) 4,1 eV. 0 4 6 8 10 12

B) 5,2 eV. D) 2,6 eV. f (10^{14} Hz)

Considerando essas informações, Na figura anterior, está representado o diagrama de níveis

A) **CALCULE** a energia mínima necessária para se de energia do átomo de hidrogênio.

remover um elétron de uma superfície de sódio 1. No século XIX, já se sabia que cada frequência do

metálico. **JUSTIFIQUE** sua resposta. espectro de emissão do hidrogênio é igual à soma ou à

B) **EXPLIQUE** o que acontece quando uma luz de diferença de duas outras frequências desse espectro.

comprimento de onda de $0,75 \times 10^{-6}$ m **EXPLIQUE** por que isso ocorre. -6 m incide sobre

a superfície de sódio metálico. 2. Sabe-se que o espectro do átomo de hidrogênio

contém as frequências $2,7 \times 10^{14}$ Hz e $4,6 \times 10^{14}$ Hz.

14. (UFMG–2009) A partir desses dados, **DETERMINE** outra frequência

A) No modelo de Niels Bohr para o átomo de hidrogênio, desse espectro que corresponde a uma luz emitida

um elétron gira em torno de um próton, em órbitas na região do visível. circulares, sob a ação de uma força atrativa. Nesse

caso, somente certos valores de raios de órbita **SEÇÃO**

ENEM são permitidos. Sejam m a massa e q o módulo da

carga do elétron. Com base nas leis da Mecânica

Clássica e da Eletrostática, bem como considerando

01. As células fotovoltaicas são fabricadas com materiais as grandezas mencionadas e as constantes físicas semicondutores, como o silício, que apresentam necessárias, **DETERMINE** a velocidade do elétron características intermediárias entre os condutores e quando este se encontra em uma órbita de raio R no os isolantes. No escuro, o selênio é isolante. Em seu átomo de hidrogênio.

estado cristalino puro, o silício é um condutor medíocre.

B) Posteriormente à formulação do modelo de Bohr, No entanto, acrescentando um pouco de fósforo ao silício,

Louis de Broglie propõe que elétrons, assim como obtém-se um ótimo condutor com elétrons livres, ou seja, outras partículas, têm propriedades ondulatórias e, com portadores de cargas livres negativas. Por isso, esse

também, que o comprimento de onda λ associado a processo é chamado de dopagem tipo N. Na dopagem **FÍSICA**

uma partícula em movimento é dado por $\lambda = h/p$, com boro, obtém-se também um ótimo condutor, mas em que h é a constante de Planck e p é a quantidade com portadores de cargas livres positivas (a ausência de movimento (momento linear) do elétron. de elétrons na faixa de condução do cristal, lacunas,

As órbitas de raios quantizados do modelo de Bohr podem ser consideradas como cargas positivas livres).

podem ser explicadas com base na consideração de Daí, o nome
dopagem tipo P. Uma célula fotovoltaica

que o perímetro de uma órbita permitida deve conter é formada de
uma camada de material tipo N e outra

um número inteiro N de comprimentos de onda de material tipo P,
conforme mostra a figura a seguir.

da onda associada ao elétron. Considerando essas Um campo elétrico é
formado devido à diferença de potencial

informações, **DETERMINE** os raios permitidos para as existente na
junção P-N. Quando a luz solar incide sobre a

órbitas de Bohr em termos de N, m, e q e, também, célula fotovoltaica,
fótons de certos comprimentos de onda

das constantes físicas necessárias. arrancam elétrons das duas
camadas, transformando-as

em condutoras de eletricidade. Por isso, uma lâmpada

15. (UFMG–2010) O espectro de emissão de luz do átomo conectada
entre as duas camadas permanecerá acesa

de hidrogênio é discreto, ou seja, são emitidas apenas enquanto a
célula receber luz.

ondas eletromagnéticas de determinadas frequências,

Carga

que, por sua vez, fornecem informações sobre os níveis

de energia desse átomo. Luz solar

Corrente

E Silício tipo N

Junção

Silício tipo P

Frente D Módulo 17

De acordo com as informações do texto, e usando

conhecimentos básicos sobre o efeito fotoelétrico, pode-se

GABARITO

concluir que a célula fotovaltaica é um dispositivo

A) que armazena energia elétrica, que aparece na forma Fixação de corrente elétrica gerada pela incidência de luz,

e o valor dessa corrente depende tanto da intensidade

da luz quanto das frequências presentes na luz. 01. Soma = 18

B) que armazena energia elétrica, que aparece na forma

de corrente elétrica gerada pela incidência de luz, e o 02.

A) $1,0 \times 10^{-10}$ m valor dessa corrente depende da intensidade da luz, B) $6,6 \times 10^{-24}$ kg.m/s mas independe das frequências presentes na luz.

C) que armazena energia elétrica, que aparece na forma C) $1,5 \times 10^2$ eV

de corrente elétrica gerada pela incidência de luz, 03. D
04. A 05. A e o valor dessa corrente independe da
intensidade da

luz como também das frequências presentes na luz.

Propostos

D) que não armazena energia elétrica, ela apenas

mantém uma corrente elétrica enquanto estiver

exposta à luz, e o valor dessa corrente depende 01. E 04. D
07. B 10. D tanto da intensidade da luz quanto das
frequências 02. B 05. C 08. B 11. C presentes na luz.

03. D 06. C 09. A 12. E

E) que não armazena energia elétrica, ela apenas

mantém uma corrente elétrica enquanto estiver 13. A) $E = 3,0 \times 10^{-19} \text{ J}$. Usando os valores exposta à luz, e o valor
dessa corrente depende da $E_{14 \text{ C}} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$, $f = 7 \times 10 \text{ Hz}$ e a equação

intensidade da luz, mas independe das frequências $h \cdot f = E_c + W$, encontramos o valor pedido. presentes na luz.

B) Não há emissão de elétrons na placa,

02. Há exatos 100 anos, o físico Ernest Rutherford faria um pois a
radiação com esse comprimento de

anúncio que mudaria para sempre os rumos da ciência: onda
corresponde a uma frequência de

o átomo tem uma região central, o núcleo, onde toda a $4,0 \times 10^{14}$
Hz, valor inferior à frequência

sua carga positiva e praticamente toda sua massa está de corte $f_0 \approx 4,6 \times 10^{14} \text{ Hz}$, correspondente

partículas alfa (dupla carga positiva) contra uma finíssima placa. A luz é absorvida pela placa, que se lâmina de ouro. Para perplexidade, Rutherford notou aquece. concentrada. Para descobrir isso, Rutherford lançou à energia mínima para arrancar elétrons da

que algumas partículas eram desviadas e umas eram

Rutherford entendeu que o ricocheteio dessas partículas K 14. A) v
 $q = . mR$ até mesmo ricocheteadas de volta. Ao final de 1910,

era o resultado de uma única interação (colisão) entre a .

partícula alfa e a carga positiva do núcleo atômico. Nesse 2 h 2 novo modelo atômico, os elétrons orbitavam o núcleo, B) $R = N 4 2 \pi K m q^2$ como um sistema planetário, em uma região esférica de

raio comparável ao tamanho do átomo. No experimento 15. 1. Considere três níveis de energia de valores

de Rutherford, a chance de uma partícula alfa passar E_m , E_m e E_p . Considere as três transições de

nas proximidades de um núcleo e sofrer desvio era bem um elétron: do nível p ao m, do m ao n e

pequena. Mais rara ainda, seria uma aproximação quase do p ao n. De acordo com o modelo de

partícula alfa em sentido contrário. Rutherford registrou são f um único desvio para trás em cada 20 mil partículas alfas $p_m = (E_p - E_m)/h$, $f_{mn} = (E_m - E_n)/h$ e f de frente contra o núcleo, com a consequente deflexão da Bohr, as frequências dos fótons emitidos

lançadas contra o alvo. $p_n p_n = (E - E)/h$, sendo h a constante de

Planck. Comparando essas expressões,

CIÊNCIA HOJE. fev. 2011 (Adaptação).

percebemos que $f_{pn} = f_{pm} + f_{mn}$, ou que

De acordo com o seu experimento, Rutherford pôde $f_{pm} = f_{pn} - f_{mn}$, ou ainda que $f_{mn} = f_{pn} - f_{pm}$.

concluir que o tamanho do núcleo atômico era Portanto, a frequência devida a uma dessas

A) muito grande, pois algumas partículas alfas incidentes transições é igual à soma das outras duas

foram refletidas pela lâmina de ouro. frequências ou igual à diferença entre elas.

B) muito grande, pois algumas partículas alfas foram $2,73 \times 10^{14}$ Hz

desviadas pela lâmina de ouro.

E) igual ao próprio tamanho do átomo, pois a massa **Seção**
enem

nuclear é praticamente igual à massa atômica.

D) ínfimo, pois pouquíssimas partículas alfas incidentes 01. D

foram refletidas de volta pela lâmina de ouro.

02.
D

E) ínfimo, pois muitas partículas alfas incidentes foram

refletidas de volta pela lâmina de ouro.

Iniciaremos o módulo apresentando os postulados da
O 2º Postulado é uma imposição para que o 1º
Postulado

Teoria da Relatividade Especial e suas consequências,
como seja respeitado. Como a velocidade da luz não
depende do

a dilatação do tempo e a contração do espaço.
Discutiremos, referencial inercial, a velocidade do
pulso luminoso na figura 1

em seguida, a conversão entre massa e energia. Na
parte é igual a c tanto no movimento de ida quanto no
movimento

final do módulo, abordaremos os seguintes fenômenos
de retorno do pulso. Por isso, o intervalo de tempo
entre a

nucleares: os decaimentos radioativos de certos
núcleos emitem e o retorno do pulso vale $\Delta t = 2L/c$,
tanto para o atômico e as reações de fusão e fissão
nuclear. trem parado quanto para o trem em
movimento uniforme.

Experiências com o pulso de luz, assim como outras

A TEORIA DA RELATIVIDADE

experiências de eletromagnetismo, não permitem
saber se o referencial está ou não em movimento.

Os postulados da Teoria da A

invariância da velocidade da luz é verificada em todos

Relatividade Restrita os referenciais inerciais e em todas as direções. Isso pode parecer surpreendente, mas medidas feitas com instrumentos

Um sistema de referência inercial é aquele que não possui modernos e extremamente precisos confirmam esse

aceleração, ou seja, ou encontra-se parado ou em movimento resultado. A seguir, apresentaremos várias consequências dos

retilíneo uniforme. Assim, a Teoria da Relatividade Restrita postulados de Einstein. São essas implicações que constituem,

(ou Especial) permite relacionar medidas de tempo e de de fato, a Teoria da Relatividade Restrita. espaço entre dois sistemas inerciais, isto é, sistemas de

referência que se deslocam em movimento retilíneo uniforme **Simultaneidade** um em relação ao outro. A Teoria da Relatividade Restrita é

sustentada pelos seguintes postulados: Quando dois eventos ocorrem no mesmo instante de

tempo, dizemos que eles são simultâneos. De acordo com



Postulado 1: As leis da Mecânica e do a

Teoria da Relatividade: Eletromagnetismo são as mesmas em

todos os referenciais inerciais. Dois eventos simultâneos em um referencial

inercial não são necessariamente simultâneos em



Postulado 2: A velocidade da luz é outro referencial inercial que se move em relação ao primeiro. absoluta (constante), independentemente



do referencial inercial de observação.

Einstein explicou essa ideia por meio do exemplo ilustrado

O 1º Postulado é o princípio da relatividade newtoniana na figura 2. Dois raios de luz A e B são produzidos em

estendido às leis do Eletromagnetismo. Assim, um passageiro locais equidistantes do observador inercial X na Terra e

dentro de um trem silencioso e sem janelas, que viaja em também equidistantes de um observador inercial Y no trem,

movimento retilíneo uniforme com velocidade v em relação que se move com velocidade constante em direção a B.

aos trilhos, não é capaz de detectar o movimento do trem. Os clarões são percebidos simultaneamente pelo observador X,

(distinguir se ele está parado ou em movimento retilíneo que conclui, corretamente, que os aparecimentos dos clarões

uniforme) por meio de aparatos mecânicos, como também são eventos simultâneos. Agora, considere o observador Y no

não pode fazê-lo por meio de medições envolvendo ímãs, trem. Para esse observador, de acordo com o 2º Postulado

fios transportando corrente elétrica ou pulsos de luz. da Relatividade, tanto o clarão B quanto o clarão A se

L aproximam dele com a mesma velocidade c . Porém, como

o trem se aproxima de B, ele percebe o clarão B primeiro,

$c > v$ os aparecimentos dos clarões não são eventos simultâneos. e só depois o clarão A. Portanto, para o observador no trem,

Se a velocidade do trem fosse comparável à velocidade da

Pulso de luz Espelho

luz (por exemplo, 60% de c), o observador Y veria o clarão

B e, a seguir, poderia voltar calmamente o seu olhar para

trás, esperar um pouco, e, só depois, perceberia o clarão

Figura 1: Experiência para constatar o movimento do trem. A chegando até ele.

Editora Bernoulli 89

Frente D Módulo 18

De acordo com o 2º Postulado de Einstein, a velocidade do

pulso de luz vale c tanto no referencial S quanto no referencial S',

independentemente do quão rápido a nave possa estar.

y Como a distância percorrida pelo pulso é maior no referencial S,

Y concluímos que o tempo Δt deve ser maior que o tempo $\Delta t'$.

c Este é chamado de tempo próprio, medido no referencial



em que os dois eventos (a emissão e o retorno do

A B pulso luminoso) ocorrem em uma mesma posição.

c O intervalo de tempo Δt medido em qualquer outro c referencial é sempre maior que o tempo próprio.

Essa expansão temporal é chamada de dilatação do

X tempo. Nos referenciais em que o tempo é dilatado,

Figura 2: Exemplo proposto por Einstein para explicar a os dois eventos ocorrem em posições diferentes.

simultaneidade e a não simultaneidade. No referencial S, observe que a emissão do pulso ocorre

Dilatação do tempo na posição x , enquanto o seu retorno se dá na posição x . A B

Na situação desse exemplo, embora tenhamos medido

o

Outra importante consequência do 2º Postulado de tempo com uma espécie de relógio de luz, todos os outros

Einstein nos conduz ao relativismo do tempo. Para entender tipos de relógio funcionam mais lentamente no interior da

esse conceito, vamos considerar os referenciais

inerciais nave, pois o relativismo do tempo não está associado ao

S e S'. O primeiro referencial é a Terra, e o segundo é mecanismo do relógio usado em sua medição, mas sim à

uma nave que viaja com uma velocidade constante v em natureza física do tempo. A figura 3 mostra dois relógios

relação à Terra. Dentro da nave, um astronauta dispara um analógicos, um marcando o tempo próprio dentro da nave

pulso de luz em direção a um espelho plano fixo no teto. e o outro marcando o tempo dilatado na Terra.

O astronauta registra um intervalo de tempo $\Delta t'$ no caminho Agora, vamos deduzir uma equação para relacionar o vertical de ida e volta, entre a emissão do pulso e o seu tempo próprio $\Delta t'$ com o tempo dilatado Δt . O primeiro é o retorno após sofrer reflexão no espelho. Ana Lúcia, uma tempo que a luz leva para percorrer a distância vertical $2L$ observadora inercial na Terra, vê o mesmo pulso percorrer um no referencial S' (L é a altura do espelho em relação à fonte caminho mais longo (na diagonal), registrando um intervalo de luz). O segundo é o tempo que a luz leva para percorrer de tempo entre a saída e o retorno do pulso igual a Δt , a distância diagonal $2D$ no referencial S. Assim: como mostra a figura 3.

$$2L = c \Delta t' \text{ e } 2D = c \Delta t$$

Ponto de vista do astronauta

Na figura 3, observe que cada uma das metades do y' caminho diagonal percorrido pela luz em S corresponde à

S' hipotenusa de um triângulo retângulo de altura L . A base

$L \Delta t'$ do triângulo é a distância que a nave percorre durante o

intervalo de tempo $\Delta t/2$. Assim, se a velocidade da nave em

x' relação à Terra é v , a base desse triângulo é dada por $v \cdot \Delta t/2$.

v Aplicando o Teorema de Pitágoras, podemos obter o valor

da hipotenusa do triângulo em função da altura e da base

D

D deste. Multiplicando o valor da hipotenusa por 2, obtemos

a
distância
diagonal
2D:

$$2_{22} D = 2 L + (v t \Delta / 2)$$

y

S Combinando essa expressão com as duas equações anteriores, obtemos a relação entre os tempos nos dois

Ponto de vista Δt referenciais. de Ana Lúcia

$$\Delta t = \gamma \Delta t', \text{ sendo } \gamma =$$

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

O fator γ que multiplica $\Delta t'$ indica o quanto o tempo
acha-se

Figura 3: Diferentes trajetórias de um pulso luminoso para quem dilatado no referencial S. Esse número é conhecido como fator

viaja na nave e para quem está na Terra. (As dimensões foram de Lorentz, em homenagem ao físico holandês Hendrik Lorentz,

exageradas para melhor entendimento do problema). por suas valiosas contribuições à Teoria da Relatividade.

90 Coleção Estudo

Introdução à Relatividade Especial

O termo v^2/c^2 é sempre menor do que 1 (pois $v < c$)

Adição relativística de velocidades
e é sempre positivo, de modo que a raiz quadrada no

denominador do fator de Lorentz é menor do que 1. Por isso, Considere um trem que se afasta com velocidade de

$\gamma > 1$. Para velocidades ordinárias, como a de carros, aviões e 60 km/h de uma estação. Se um passageiro caminhar

foguetes, o valor de v_2/c_2 tende a zero e γ é praticamente 1. com velocidade de 1 km/h em relação ao trem no sentido

Por isso, em nosso dia a dia, não percebemos a dilatação do seu movimento, alguém parado na estação verá o

do tempo. Foi esse um dos motivos pelo qual a relatividade passageiro se afastando com a velocidade de 61 km/h.

do tempo demorou tanto para ser descoberta. Para pequenas velocidades, o cálculo através da simples

Quando a velocidade de um corpo é comparável à velocidade adição ou subtração das velocidades é adequado. Porém,

da luz, o fator γ é suficientemente maior que 1, de modo que para velocidades comparáveis à velocidade da luz,

a dilatação do tempo é perceptível. Para exemplificar esse o cálculo feito desta maneira não fornece resultados

fenômeno, considere que a nave da figura 3 se afaste da Terra corretos. Por exemplo, considere uma nave se

com velocidade $v = 0,6c$. O astronauta comunica à estação afastando de uma estação espacial com uma velocidade

de controle terrestre que ele vai descansar durante 1 hora. $v = 0,4c$ (c é a velocidade da luz). Dentro da nave, ¹ Na Terra, quanto tempo irá durar o descanso? A resposta não um elétron é emitido no mesmo sentido do movimento da

é 1 hora, pois o início e o final do descanso não ocorrem na nave com uma velocidade $v = 0,8c$ em relação à nave. ² mesma posição no referencial terrestre. Portanto, o tempo Qual é a velocidade do elétron em relação à estação? terrestre é dilatado do fator de Lorentz, que vale: A adição simples das velocidades nos conduz à seguinte

$\gamma = 1 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ resposta: $0,4c + 0,8c = 1,2c$. Porém, essa velocidade é maior $\gamma = 1 / \sqrt{1 - (1,2c)^2/c^2} = 1,25$, que a velocidade da luz, o que é impossível de acordo com

Então, a Teoria da Relatividade. No caso de as velocidades serem $\Delta t = 1,25$. $\Delta t' = 1,25 \cdot 1h = 1,25$ h.

comparáveis à velocidade da luz, devemos usar a seguinte

Portanto, o descanso medido na Terra é de 1,25 h.

equação relativística de adição de velocidades (não vamos

Contração do comprimento deduzir a equação, e tampouco você precisa memorizá-la):

tempo é a contração do comprimento. Para explicarmos Um fenômeno diretamente relacionado à dilatação do v $v + v_1 =_{22} 1 + (v v c /)_{12}$

esse conceito, observe a grande régua da figura 3.

Substituindo as velocidades do elétron e da nave nessa

FÍSICA

O comprimento da régua medido no referencial S, na expressão, obtemos: qual ela se acha em repouso, é chamado de comprimento

próprio L . Ana Lúcia pode calcular esse comprimento, $0,4 \cdot c_p + 0,8 \cdot c_v = = 0,91 \cdot c$ usando a expressão $L = v \cdot \Delta t$, em que v é a velocidade da $1 + (, 0,4 \cdot 0,8 \cdot c \cdot , c c /)$ nave, e Δt é o tempo que a nave leva para se deslocar de x até x (posições alinhadas com as extremidades da régua). _{AB} Agora, o resultado é possível. Um cientista na estação

De dentro da nave, o astronauta vê a Terra passando com espacial detecta o elétron se afastando dele com uma

uma velocidade $-v$ (o sinal negativo indica que o sentido velocidade muito alta, porém inferior à

velocidade da luz.

de movimento da Terra é oposto ao da nave). De forma

Podemos usar a equação anterior para calcular a semelhante, o astronauta pode calcular o comprimento da

régua através da expressão $L = v\Delta$ velocidade da luz no seguinte caso. Em vez do elétron,

t' . Para ele, as passagens

imagine que um pulso de luz seja disparado de dentro mesma posição do seu referencial S' . Por isso, o tempo da nave com a velocidade $v = c$ e no mesmo sentido da Δ das extremidades da régua pela nave ocorrem em uma

t'_2

medido por ele é menor que o tempo velocidade $v = 0,4c$ da nave. A velocidade do pulso luminoso Δt medido por Ana₁

Lúcia. Como consequência disso, o astronauta vê a barra em relação à estação pode ser obtida substituindo-se

contraída. É fácil mostrar que o fator de contração do as velocidades da nave e do pulso na equação anterior.

comprimento vale $1/\gamma$. Isso nos leva ao seguinte resultado: γ . Assim, se a nave se move com uma

velocidade $v = 0,6c$ (ou seja, $1/\gamma = 0,8$), e o comprimento próprio da régua for $L = 10 \text{ m}$, o astronauta verá a régua com o comprimento $L_p = L(1/\gamma) = 10 \cdot 0,8 = 8 \text{ m}$.

Agora, imagine que o astronauta veja a sua nave com Assim, a velocidade do pulso de luz em relação à estação

um comprimento de 3 m e uma altura de 2 m . Esses também vale c , o que é consistente com o 2º Postulado da

são os comprimentos próprios da nave, pois ela está em

Teoria
da
Relatividade

repouso em relação ao astronauta. Da Terra, Ana Lúcia vê

a nave contraída com um comprimento $L = 3 \cdot 0,8 = 2,4 \text{ m}$. Por último, destacamos o fato de que a equação relativística

Como a nave não apresenta movimento na direção vertical (y), de adição de velocidades se reduz à equação clássica

a altura da nave não é contraída. Portanto, Ana Lúcia vê quando as velocidades são pequenas. Nessas situações,

a nave com a sua altura própria, de 2 m. Logo, podemos o produto $v \cdot v$ é muito menor que c^2 . Por isso, o termo γ concluir que, assim como na dilatação do tempo, a contração entre parênteses na equação relativística é praticamente

do comprimento é percebida nos referenciais em movimento zero, o denominador se iguala a 1, e a velocidade v

em relação ao objeto de medida. se iguala à soma algébrica simples de v e v . γ

Editora Bernoulli 91

Frente D Módulo 18

A energia relativística Fóton de radiação gama Pósitron

No início do século XX, os princípios da conservação da + e

energia e da massa eram conceitos distintos. Basicamente,

o Princípio da Conservação da Energia envolvia os processos

mecânicos, térmicos, químicos e eletromagnéticos. De outro _e lado, a conservação da massa se aplicava à não modificação da Fóton de Elétron massa em

transformações físicas (ebulição, forjamento, etc.)
radiação gama e químicas (oxidação, combustão, etc.).

Figura 4: A produção de pares é um exemplo de conversão de

No desenvolvimento da Teoria da Relatividade,
Einstein *energia em massa*.

concluiu que a matéria em si é uma forma de energia.
Com essa

ideia, Einstein unificou os princípios da conservação
da energia – pósitron valem, cada uma, $m = 9,1 \times 10^{-31}$ kg.
As massas dos fótons são nulas. As massas do elétron e
do kg. Essas massas

e da massa em um único conceito. De acordo com a
Teoria da

surgem a partir das energias dos fótons, cuja soma
vale

Relatividade, um corpo de massa m possui uma
energia, que $2hf$ ($h = 6,6 \times 10^{-34}$ J.s é a constante de
Planck, e f é a frequência de cada fóton).
Igualando $2hf$ com a energia

de repouso $E = 2mc^2$ das duas partículas, obtemos
para a



$E = mc^2$ frequência dos fotóns o valor $f = 1,24 \times 10^{20}$
Hz. Veja que esse

valor de frequência está inserido na faixa da radiação gama.

Essa energia é chamada de energia de repouso. Ao efetuarmos o cálculo relativo ao processo de produção

Naturalmente, se um corpo está em movimento, além da do par elétron/pósitron, igualamos a energia hf de cada

parcela mc^2 , o corpo também possuirá uma parcela de fóton à energia mc^2 de cada partícula, e, por consequência,

energia cinética. A energia de repouso, quando liberada, desprezamos a energia cinética E das partículas. c aparece na forma de energia eletromagnética. Como a Nas situações em que essa energia é expressiva, devemos

velocidade da luz é muito grande e como aparece elevada ao efetuar os cálculos considerando a energia total, que é dada por:

quadrado na equação anterior, podemos verificar, por meio $E = E + mc^2$

de cálculos simples, o gigantesco potencial energético da Para velocidades comparáveis à velocidade da luz,

massa. Imagine, por exemplo, que uma massa igual a 1 kg a energia cinética não pode ser calculada pela equação clássica

tenha sido integralmente convertida em energia. $E = mv^2/2$. Considerando os efeitos relativísticos, é

possível. De acordo com Einstein, essa energia possui um valor igual ao necessário para provar que a energia cinética de uma partícula é dada por:

a $1,0(3 \times 10^8)^2$ joules ou $2,5 \times 10^{10}$ kWh. A um custo de $E = (\gamma - 1)mc^2$ γ 50 centavos o kWh, essa energia vale 12,5 bilhões de reais.

Substituindo essa expressão na equação anterior, obtemos

Não é simples converter grandes quantidades de massa em uma expressão para a energia relativística total:

em energia. Na natureza, parcelas ínfimas de massas $E = (\gamma - 1)mc^2 + mc^2 = \gamma mc^2$

atómicas são transformadas em energia. Quando a taxa de produção do par elétron/pósitron descrito anteriormente,

de átomos mutantes é elevada, a energia gerada pode ser tão grande que as velocidades das partículas são pequenas, de forma que

muito grande. É dessa forma que ocorre a produção de $\gamma = 1$. Por isso, a energia total pode ser aproximada por $E = mc^2$. energia nas estrelas, nas quais núcleos leves de hidrogênio

Em alguns textos sobre a Teoria da Relatividade, se fundem, transformando-se em núcleos de hélio (fusão

a quantidade de movimento de uma partícula é expressa

nuclear). A conversão de massa em energia também explica pela equação clássica $Q = mv$, em que a massa é dada por

a geração de energia nas usinas nucleares, nas quais núcleos $m = \gamma m_0$. Desse ponto de vista, a massa é relativística e os pesados de urânio são quebrados em núcleos mais leves aumenta com a velocidade. Para a partícula em repouso,

(fissão nuclear). $\gamma = 1$, e a sua massa vale m_0 (massa de repouso).

Para a partícula em movimento, $\gamma > 1$, e a massa vale

De forma inversa, a energia eletromagnética também pode

ser convertida em massa. Por exemplo, a figura 4 mostra $m > m_0$. Atualmente, entende-se que a massa é uma

propriedade física da matéria, tendo o mesmo valor em todos

o processo de formação de pares elétron/pósitron em que os referenciais. Nesse caso, a quantidade de movimento é dada

dois fótons de radiação gama colidem, convertendo as por $Q = \gamma mv$. Quando a velocidade de uma partícula aumenta, suas energias nas massas das duas partículas produzidas: a sua quantidade de movimento também aumenta, pois tanto

um elétron (e^-) e um pósitron (e^+). O pósitron (antipartícula v quanto o fator γ crescem. Contudo, a

massa da partícula do elétron) possui a mesma massa e carga de mesmo módulo permanece constante. Você deve ficar atento, pois, em alguns

que o elétron, tendo, contudo, carga positiva. exames, o conceito da massa relativística ainda é usado.

92 Coleção Estudo

Introdução à Relatividade Especial

RADIOATIVIDADE Radiação γ Radiação α

Descoberta e constituição da Radiação β

radioatividade Polo norte S Em 1896, Antoine Becquerel descobriu acidentalmente do ímã a radioatividade, quando colocou sais de urânio dentro N de uma caixa fechada, na qual também havia uma placa

Amostra de rádio

fotográfica. Apesar de o interior da caixa ser escuro, no dia seguinte, Becquerel verificou que a placa havia furo dentro do bloco colocada em um lado sensibilizada por algum tipo de radiação. Ele concluiu

de chumbo corretamente que o urânio tinha a propriedade de emitir *Figura 6: Experimento para determinação das cargas elétricas*

espontaneamente essa radiação. Em seguida, diversos das radiações α , β e γ . cientistas se dedicaram ao estudo da radiação emitida

espontaneamente por corpos frios. Entre eles, destacam-se A partícula α é composta de dois nêutrons e de dois

os nomes de Pierre e Marie Curie. prótons, sendo, portanto, um núcleo do átomo de hélio.

No decaimento α , um núcleo original de número atômico Z e

A radiação não é uma manifestação da energia dos número de massa A se transforma em um novo núcleo com

elétrons de um átomo, mas sim de seu núcleo. A radiação

número atômico $Z - 2$ e número de massa $A - 4$. A figura 7

é um fenômeno natural, ou artificial, em que os núcleos de

certos elementos instáveis emitem três radiações básicas: ilustra o decaimento α do urânio 238 ($Z = 92$ prótons,



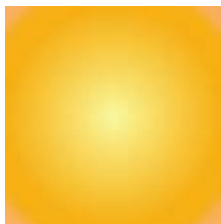
alfa (α $N = 146$ nêutrons e $A = Z + N = 238$). O resultado é o aparecimento β), beta (β) e gama (γ

). Quando o elemento emite tais

do tório 234 ($Z = 90$ prótons, $N = 144$ nêutrons e $A = 234$).

radiações, dizemos que ele sofreu decaimentos α , β e γ .

A radioatividade pode ser muito perigosa para os seres



humanos, contudo, usada de forma controlada, ela possui



várias aplicações, inclusive medicinais. Entre essas aplicações, 92 + Partícula α + 90

temos a datação de fósseis e de minerais, por meio da medição + +

146 144

de sua atividade radioativa, a geração de energia em usinas

nucleares, por meio da fissão nuclear, e o bombardeamento **FÍSICA**

de células cancerosas com radiação gama.

Urânio 238 Tório 234

β e *Figura 7: Decaimento alfa.* A figura 5 ilustra o poder de penetração das radiações α , γ sobre a matéria. A radiação α é facilmente bloqueada

por folhas de papel e pelo corpo humano. A radiação β é A radiação β é constituída por elétrons muito energéticos. mais penetrante, sendo bloqueada por metais leves, como o Embora sejam provenientes do núcleo atômico, esses elétrons

alumínio. A radiação γ é a mais penetrante, e pode

atravessar não se acham em seu interior antes de o decaimento ocorrer.

muitos metais. Ela pode ser bloqueada por grossas placas O elétron é criado no momento da emissão, quando um nêutron

de chumbo e por paredes de concreto. se transforma em um próton e em um elétron. Nesse tipo

de decaimento, o núcleo original de número atômico Z

Radiação se transforma em um novo núcleo de número atômico α

$Z + 1$, sem que haja alteração do número de massa. A figura 8

Alumínio ilustra o decaimento β do carbono 14 ($Z = 6$ prótons, Chumbo

Radiação β $N = 8$ nêutrons e $A = 14$). O resultado é o aparecimento do



nitrogênio 14 ($Z = 7$ prótons, $N = 7$ nêutrons e $A = 14$) e a

emissão
da
partícula
 β .

Radiação γ



${}^6_7\text{Li} + {}^4_2\text{He} + \text{Partícula } \beta$



${}^8_7\text{N}$

Figura 5: Poder de penetração das radiações α , β e γ na matéria.

Fazendo passar um feixe radioativo por um campo
Carbono 14 Nitrogênio 14

descobriram que a radiação *Figura 8: Decaimento beta.* α
magnético, como mostrado na figura 6, os cientistas

possui carga positiva, que a

radiação β possui carga negativa e que a radiação γ é neutra. O decaimento β pode ocorrer também por meio da emissão. Observe que o desvio sofrido pela radiação α é menor que de um pósitron (que é a antipartícula do elétron). Nesse caso,

aquele sofrido pela radiação β . O motivo principal para a um próton se transforma em um nêutron e em um pósitron.

ocorrência desse fenômeno é o fato de que a massa da O núcleo original (Z, A) transforma-se em um núcleo de

partícula α é muito maior que a massa da partícula β . número atômico $Z - 1$ e número de massa A .

Editora Bernoulli 93

Frente D Módulo 18

A radiação γ é constituída de fótons de alta energia e de **Tempo de meia-vida**

alta frequência emitidos pelo núcleo atômico. Esses fótons

são emitidos em decorrência de os prótons e os nêutrons O tempo de meia-vida é o tempo necessário para que

sofrerem transições entre os níveis de energia existentes uma amostra radioativa tenha a metade dos seus isótopos

no núcleo. Esses níveis são semelhantes aos níveis de transformados em outros núcleos. Como a taxa de emissão

energia dos elétrons. Porém, as diferenças de energia de partículas (α ou β) depende diretamente do número existentes entre níveis nucleares são muito maiores do de núcleos radioativos, o período de meia-vida também é

que aquelas existentes entre os níveis eletrônicos. Por isso, igual ao tempo para que a atividade radioativa da amostra

os fótons emitidos pelo núcleo são muito mais energéticos seja reduzida à metade. O tempo de meia-vida é uma

(de frequências maiores) que os fótons provenientes de propriedade de cada isótopo radioativo, podendo variar de

transições envolvendo elétrons. milionésimos de segundo a bilhões de anos, dependendo

do elemento. Na tabela a seguir, indicamos os períodos de

Causa da radioatividade meia-vida de alguns elementos. Por exemplo, o rádio 226

possui tempo de meia-vida de 1 620 anos. Isso
significa

que uma amostra cristalina de 100 g de rádio terá a
metade

No interior do núcleo, os prótons se repelem
mutuamente dessa massa transformada em outro
elemento depois de

devido às forças elétricas. Por isso, alguns núcleos não
são 1 620 anos, restando 50 g de rádio. Transcorridos
mais

estáveis e se desintegram em núcleos menores por
meio 1 620 anos, restarão 25 g de rádio, e assim por
diante.

dos decaimentos radioativos. Os núcleos estáveis não
se

rompem porque existe uma interação atrativa entre
prótons **Tempo de meia-vida de alguns elementos e**
nêutrons capaz de superar a repulsão elétrica entre os

prótons. Essa interação é uma manifestação da
chamada **Elemento Isótopo Meia-vida força nuclear forte.**
214 0,001 s

A interação atrativa nuclear se manifesta de forma
igual Polônio 218 3 min

entre prótons e nêutrons, não dependendo da carga
elétrica. 210 138 dias Porém, essa força é de curto
alcance, manifestando-se Potássio 42 12,4 horas

apenas entre partículas muito próximas. Por isso, para
Iodo 131 8 dias compensar a repulsão elétrica, os núcleos

mais pesados

Cobalto 60 5,27 anos

que o número de prótons. Todavia, quando o núcleo é muito 235 710 milhões de anos Urânio devem possuir um número de nêutrons sensivelmente maior

grande, a instabilidade é inevitável. Átomos com $Z \geq 83$ 238 4,5 bilhões de anos

não são estáveis. Alguns isótopos com $Z < 82$ também Carbono 14 5 730 anos

podem não ser estáveis. Nesses casos, os núcleos sofrem Rádio 226 1 620 anos uma sequência de decaimentos α e β (acompanhados de decaimentos γ) que o transformam em um núcleo estável. O gráfico apresentado na figura a seguir mostra a evolução

A figura 9 mostra a sequência que leva o urânio 238 ($Z = 92$ da massa de rádio em função do tempo. Podemos usar esse

e $N = 146$) ao elemento chumbo 206 ($Z = 82$ e $N = 124$). gráfico para calcular a idade de um mineral. Por exemplo,

Observe que a parte inferior da sequência pode ocorrer por se a análise química revelar que um mineral é constituído de

meio de caminhos alternativos. 6,25% de rádio 226 e 93,75% de chumbo 206, significa que

foram decorridos 4 períodos de meia-vida desde a formação

Urânio 238 do mineral puro. Portanto, como a meia-vida do rádio 226

238 é de 1 620 anos, concluímos que a idade do mineral é de

234 4.1 620 anos, ou seja, 6 480 anos.

230 β 100 α Instante de cristalização do

mineral

226

222 Núcleos de rádio 226

Núcleos de chumbo 206

218)

214 50 M (g

A = Número de massa Depois de 2 períodos 210 de meia-vida
25 Chumbo 206 206

80 12,5 82 84 86 88 90 92 6,25

Z = Número atômico Tempo (Anos)

0 1 620 3 240 4 860 6 480 8 100

Figura 9: Transformação do U-238 em Pb-206 por meio de vários

decaimentos α (diagonal) e β (horizontal). Figura 10: Evolução da massa de uma amostra de rádio 226.

Introdução à Relatividade Especial

EXERCÍCIO RESOLVIDO EXERCÍCIOS DE FIXAÇÃO

01. (UEPB–2010) A tabela a seguir fornece o valor das energias de repouso

de algumas partículas elementares e de alguns núcleos **Instrução:** Os exercícios **01** e **02** referem-se ao texto a seguir.

leves, isto é, a energia que se deve exclusivamente às suas massas. O deutério e o trítio são isótopos do A relatividade proposta por Galileu e Newton, na Física hidrogênio. Clássica, é reinterpretada pela Teoria da Relatividade Restrita,

Partícula Energia de proposta por Albert Einstein (1879-1955) em 1905, que é

Símbolo revolucionária porque mudou as ideias sobre o espaço e **repouso (MeV)**

o tempo, uma vez que a anterior era aplicada somente a

Próton P+ 938,280 referenciais inerciais. Em 1915, Einstein propôs a Teoria Geral

Nêutron da Relatividade válida para todos os referenciais (inerciais e n 939,573

não inerciais).

Deutério 2H ou d 1 875,628

Trítio 3 Acerca do assunto tratado no texto anterior,
podemos **01**. H ou t 2 808,944

afirmar:

Hélio He 3 727,409 I. A Teoria da Relatividade afirma que a
velocidade da

luz não depende do sistema de referência.

A) Determinar a energia de ligação do deutério.

B) Em uma das reações de fusão nuclear no Sol, deutério II. Para a
Teoria da Relatividade, quando o espaço

e trítio se fundem em hélio, com a emissão de um dilata, o tempo
contraí, enquanto que, para a física

nêutron, como mostra a figura a seguir. Calcular a newtoniana, o
espaço e o tempo sempre se mantêm

energia gerada nessa reação. absolutos.

Deutério Nêutron III. A Mecânica Clássica e a Teoria da Relatividade
não limitam a velocidade que uma partícula pode

adquirir

IV. Na relatividade de Galileu e Newton, o tempo não

depende do referencial em que é medido, ou seja, **FÍSICA**

Trítio Hélio é absoluto.

Após a análise feita, é(são) **CORRETA(S)** apenas a(s)

proposição(ões)

Resolução: A) II e III.

B)
I e
IV.

A) O deutério é um isótopo do hidrogênio constituído

de um próton e de um nêutron ligados. A soma das C) I, II e IV. energias de repouso do próton e do nêutron não

D)
III.

ligados vale $938,280 + 939,573 = 1\,877,853$ MeV.

Observe que esse valor é maior do que a energia E) III e IV. de repouso do deutério, que vale $1\,875,628$ MeV.

A diferença entre essa energia e a soma anterior é

02. (UEPB–2010) Ainda acerca do assunto tratado no texto

energia de ligação do deutério, valor confirmado em anterior, resolva a seguinte situação-problema: Considere $1\,875,628 - 1\,877,853 = -2,225$ MeV. Essa é a

experiências realizadas no laboratório. uma situação fictícia, que se configura como uma

exemplificação da relatividade do tempo.

B) A equação da reação de fusão é a seguinte:

Um grupo de astronautas decide viajar numa nave

${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n} + E$ espacial, ficando em missão durante seis anos, medidos

Nessa reação, E representa a energia liberada. no relógio da nave. Quando retornam à Terra, verifica-se

A soma das energias de repouso do deutério e do que aqui se passaram alguns anos.

trítio vale $1\,875,628 + 2\,808,944 = 4\,684,572$ MeV. Considerando que c é a velocidade da luz no vácuo e que Observe que essa soma é maior que a soma das velocidades médias da nave é $0,8c$, é **CORRETO** afirmar energias de repouso do hélio e do nêutron, que vale que, ao retornarem à Terra, se passaram $3\,727,409 + 939,573 = 4\,666,982$ MeV. A diferença

entre a soma das energias de repouso do deutério e A) 20 anos. do trítio e da soma das energias do hélio e do nêutron

B) 10 anos.

é $4\,684,572 - 4\,666,982 = 17,59$ MeV. Esse valor

é a energia E liberada na reação nuclear de fusão. C) 30 anos.

diminuição da massa de repouso do Sol. À medida que D) 12 anos. Devido à emissão dessa energia, ocorre uma o Sol emite energia, sua massa diminui. E) 6 anos.

Editora Bernoulli **95**

Frente D Módulo 18

03. (PUC RS–2007) Considere as informações a seguir.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

A energia que as estrelas e o Sol irradiam por bilhões

de anos nasce da reação nuclear conhecida como fusão. **01.** (UFMA–2007) Analise as proposições a seguir sobre os

Esta acontece no interior das estrelas, sob altíssimas

Princípios da Relatividade Restrita. Em seguida, marque

temperaturas. De uma forma simplificada, podemos dizer

a alternativa que indica as informações **VERDADEIRAS**.

que dois dêuterons (núcleos do deutério, ou hidrogênio

pesado, formado por um próton e um nêutron) se unem I. A Teoria da Relatividade Restrita é válida para

(fundem) dando origem a um núcleo de hélio. A relação qualquer tipo de referencial.

$\Delta E = mc^2$, que expressa a relação entre massa e energia, II. A velocidade da luz no vácuo é constante, pois

pode ser lida como: “à cada variação ΔE de energia independe do movimento da fonte ou do referencial

corresponde uma variação Δm de massa e vice-versa”.

do
observ

Por outro lado, c representa o valor da velocidade da

luz no vácuo. Considerando a massa de cada dêuteron III. A Teoria da Relatividade Restrita só é válida para

como m , e a massa do núcleo de hélio como $1,99 m$, velocidades muito menores que a velocidade da luz.

é **CORRETO** afirmar que, no processo de fusão de dois

IV. A simultaneidade é relativa.

dêuterons em um núcleo de hélio,

V. A Teoria da Relatividade Restrita diz que existe

A) houve ganho de massa.

uma equivalência entre massa e energia, dada pela

B) a diferença de massa foi $0,99 m$.

equaçã

$$E = mc^2.$$

C) a energia liberada na fusão aumenta a massa total

do Sol. A) I – II – IV

D) a energia liberada na fusão não altera a massa total B) II – IV – V

do Sol.

C)
II –
III
–
V

E) a energia liberada na fusão diminui a massa total do

D)
II –
III
–
IV

Sol.

E)
I –
IV
–
V

04. (PUC-Campinas-SP) Protestos de várias entidades

ecológicas têm alertado sobre os danos ambientais

02. (CEFET-MG–2009) Einstein deixou um grande legado

causados pelas experiências nucleares francesas no para a humanidade ao apresentar de forma brilhante

Atol de Mururoa. Isótopos radioativos prejudiciais aos a Teoria da Relatividade Restrita. Segundo essa teoria,

seres vivos, como ^{90}Sr , formam o chamado lixo nuclear

para uma partícula que se move com velocidade próxima
desses experimentos.

à da luz, grandezas físicas como tempo, espaço e massa,

Quantos anos são necessários para que uma amostra
respectivamente,

de ^{90}Sr , lançada no ar, se reduza a 25% da massa inicial?

Dado: meia-vida do $\text{Sr} = 28,5$ anos.

^{90}A) dilata, dilata, diminui.

A) B) dilata, contrai, diminui. 28,5 C) 85,5 E) 114

B) 57,0 D) 99,7 C) contrai, contrai, diminui.

D) contrai, dilata, aumenta.

05. (UFMG) O principal processo de produção de energia E) dilata,
contrai, aumenta.

na superfície do Sol resulta da fusão de átomos de

hidrogênio para formar átomos de hélio. De uma
forma **03.** (UFMG) Observe esta figura.

bem simplificada, esse processo pode ser descrito como

a fusão de 4 átomos de hidrogênio ($m_{\text{H}} = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$)

para formar um átomo de hélio ($m = 6,65 \times 10^{-27} \text{ kg}$). $_{\text{He}}$ Priscila

Suponha que ocorram 10^{38} Nave reações desse tipo a cada

A) Considerando essas informações, **EXPLIQUE** como

a velocidade da luz. Para se comunicar com Paulo Sérgio,

A)
I e
IV

Priscila, que está na plataforma, envia um pulso luminoso em direção à nave. Com base nessas informações, B) II e III é **CORRETO** afirmar que a velocidade do pulso medida C) III e IV por Paulo Sérgio é de

D)
I,
II e
III

A) 0,7c. B) 1,0c. C) 0,3c. D) 1,7c.

E)
I,
II e
IV

04. (UFMG–2008) Suponha que, no futuro, uma base

avançada seja construída em Marte. **06.** (Unirio-RJ–2006) Duas pessoas, A e B, têm uma

lanterna cada uma. Em certo instante, elas ligam suas

Suponha, também, que uma nave espacial está viajando

lanternas e a luz emitida é vista por dois observadores:

em direção à Terra, com velocidade constante igual à

O e O'. O primeiro encontra-se parado e equidistante delas, metade da velocidade da luz.

enquanto o segundo se encontra dentro de um avião que

Quando essa nave passa por Marte, dois sinais de

viaja horizontalmente com velocidade v . No instante

rádio são emitidos em direção à Terra – um pela base

em que as lanternas são ligadas, eles encontram-se

e outro pela nave. Ambos são refletidos pela Terra e,

no mesmo ponto P , conforme a figura.

posteriormente, detectados na base em Marte.

Sejam t e t' os intervalos de tempo total de viagem dos B e O'

N e O

sinais emitidos, respectivamente, pela base e pela nave, P

desde a emissão até a detecção de cada um deles pela

base em Marte.

Considerando-se essas informações, é **CORRETO**

afirmar que $A < B$

A) $t_A < t_B$ Algum tempo depois, os observadores comunicam-se e FÍSICA
 $t_A = t_B$ B) $t_A > t_B$ C) $t_A = t_B$ D) $t_A < t_B$

O faz a seguinte afirmação: “A e B acenderam a lanterna

B) $t_A = t_B = t_N$ D) $t_A < t_B$ ao mesmo tempo”. Quando O' ouve esta afirmação,

se surpreende e diz que “B acendeu a lanterna antes de A”.

05. (UEL-PR–2008) Os múons são partículas da família dos Em relação às afirmações relativas a O e O' , pode-se léptons, originados

pela desintegração de partículas afirmar, rigorosamente, que píons em altitudes elevadas na atmosfera terrestre,

usualmente a alguns milhares de metros acima do nível A) somente o observador O' está certo.

do mar. Um múon típico, movendo-se com velocidade B) os dois observadores estão errados.

de $0,998c$, realiza um percurso de aproximadamente 600 m durante seu tempo de vida média de 2×10^{-6} s. C) somente o observador O está certo.

Contudo, o tempo de vida média desse múon, medido D) os dois observadores estão certos.

por um observador localizado no sistema de referência E) somente um deles está errado.

da Terra, é de 30×10^{-6} s. Considere a velocidade da luz

$c = 3 \times 10^8$ m/s. Com base nos conhecimentos sobre a **07**. (UFC-2010) Em relação a um sistema de referência em

Teoria da Relatividade, analise as seguintes afirmativas: repouso, dois elétrons movem-se em sentidos opostos ao

I. Essa discrepância de valores é explicada pelo aumento longo da mesma reta, com velocidades de módulos iguais

do tempo de vida média da partícula no sistema de a $c/2$. Determine a velocidade relativa de aproximação

referência da Terra, por um fator de Lorentz no valor entre os elétrons. Em seguida assinale a alternativa que

aproximado de 15 para a velocidade dada. apresenta **CORRETAMENTE** essa velocidade.

II. No sistema de referência da Terra, um múon com essa

A)
 $c/2$

velocidade percorre cerca de 9 000 m.

B)
3c/4

III. No sistema de referência da Terra, um múon com essa
velocidade percorre cerca de 3 000 m. C) 3c/5

IV. Observações e medidas desse tipo confirmam D) 4c/5
previsões relativísticas. E) c

Editora Bernoulli 97

Frente D Módulo 18

08. (UFPel-RS-2007) Considere as afirmativas a seguir. A partir do ano de 2007 e com base nos dados fornecidos,

I. O tempo transcorre da mesma maneira em qualquer a quantidade em gramas do sal $^{137}\text{CsCl}$ nos resíduos, após

referencial inercial, independentemente da sua o tempo equivalente a uma meia-vida do césio 137, será,

velocidade. aproximadamente,

II. O comprimento dos corpos diminui na direção do A) 5,0.
movimento.

B)
6,4.

III. Quando a velocidade de um corpo tende à velocidade

C)
8,0.

da luz, sua massa tende ao infinito.

De acordo com seus conhecimentos sobre Física Moderna e as informações dadas, está(ão) **CORRETA(S)** a(s) E) 12,8. afirmativa(s)

A) I e III. **11.** (UEG–2007) Com base nos conhecimentos atuais da C) II e III. E) II.

Física, é **INCORRETO** afirmar:

B) I e II. D) I, II e III.

A) A velocidade da luz é um invariante físico.

09. (CEFET-MG–2009) Considere as informações a seguir. B) A energia do Sol tem origem na fusão de átomos de

O elemento radioativo célio 137 tem meia-vida de hidrogênio.

30 anos. Meia-vida é o intervalo de tempo após o qual

C) É possível gerar energia elétrica em grande quantidade

o número de átomos radioativos existentes, em certa

amostra, fica reduzido à metade de seu valor inicial. a partir do efeito fotoelétrico.

Uma amostra de 120 átomos desse material estará D) Nos reatores nucleares, a diferença de potencial

reduzida a 15 átomos após um período de tempo, elétrico é criada no processo de desintegração dos

em anos, igual a átomos radioativos.

A) 60. C) 120. E) 240.

B) **12.** (UFRGS–2007) O PET (*Positron Emission Tomography* ou 90. D) 180.

tomografia por emissão de pósitron) é uma técnica de

10. diagnóstico por imagens que permite mapear a atividade (UFG–2008) Em 2007, completaram-se 20 anos do

acidente radiológico com o cério 137 em Goiânia. cerebral por meio de radiações eletromagnéticas emitidas

No ano do acidente, 20 g de cloreto de cério 137, por total pelo cérebro. Para a realização do exame, o paciente

desconhecimento do conteúdo e de suas consequências, ingere uma solução de glicose contendo isótopo radioativo

foram liberados a céu aberto, provocando um dos maiores flúor-18, que tem meia-vida de 110 minutos e decai por

acidentes radiológicos de que se tem notícia. Após a emissão de pósitron. Essa solução é absorvida rapidamente

tragédia, o dejetos radioativos foi armazenado num local pelas áreas cerebrais em maior atividade. Os pósitrons

próximo à cidade de Abadia de Goiás. O gráfico a seguir

emitidos pelos núcleos de flúor-18, ao encontrarem mostra a curva de decaimento radioativo do cério.

elétrons das vizinhanças, provocam, por aniquilação de 100 pares, a emissão de fótons de alta energia. Esses fótons e 90 são empregados para produzir uma imagem do cérebro 80 em funcionamento.

70 Supondo-se que não haja eliminação da solução pelo

em atividade organismo, que porcentagem da quantidade de flúor-18 60 C ingerido ainda permanece presente no paciente 5 horas 50

e 30 minutos após a ingestão?

30 A) 0,00%

20 B) 12,50%

percentagem de Cs 10 C) 33,33% Po 0 D) 66,66% 0 10 20 30 40 50
60 70 80 90 100

Tempo (anos) E) 87,50%

98 Coleção Estudo

Introdução à Relatividade Especial

13. (UERJ) O reator atômico instalado no município **16.** (UFMG)
Após ler uma série de reportagens sobre o

de Angra dos Reis é do tipo PWR (reator de água acidente com cézio
137 que aconteceu em Goiânia,

pressurizada). O seu princípio básico consiste em em 1987, Tomás
fez uma série de anotações sobre a

obter energia através do fenômeno da fissão nuclear, emissão de
radiação por cézio:

- O cézio 137 transforma-se em bário 137, emitindo

em que ocorre a ruptura de núcleos pesados em outros

uma radiação beta.

mais leves, liberando grande quantidade de energia.

- O bário 137, assim produzido, está em um estado

Esse fenômeno pode ser representado pela seguinte

excitado e passa para um estado de menor energia,

equação nuclear: emitindo radiação gama.

$n_1 + U_{235} \rightarrow Cs_{144} + T + 2 n_1 + \text{Energia}$ • A meia-vida do cézio 137 é de 30,2 anos e sua massa

atômica é de 136,90707 u, em que u é a unidade de

Os números atômicos e de massa do elemento T estão, massa atômica ($1 u = 1,6605402 \times 10^{-27} \text{ kg}$).

respectivamente, indicados na seguinte alternativa: • O bário 137 tem massa de 136,90581 u e a partícula

beta, uma massa de repouso de 0,00055 u.

A) 27 e 91

A) Tomás concluiu que, após 60,4 anos, todo o cézio

B) 37 e 90

radioativo do acidente terá se transformado em bário.

C) 39 e 92 Essa conclusão é verdadeira ou falsa? **JUSTIFIQUE**

sua resposta.

D) 43 e 93

B) O produto final do decaimento do cézio 137 é o

14. (FUVEST-SP) Na reação de fusão nuclear representada por: processo, é da ordem de 10 bário 137. A energia liberada por átomo, nesse $6 \cdot 10^{-13} \text{ eV}$, ou seja, 10 J.

$^1_1\text{H} + ^1_1\text{H} \rightarrow ^2_1\text{H} + \text{Energia}$ **EXPLIQUE** a origem dessa energia. $^2_1\text{H} + ^3_1\text{H} \rightarrow ^4_2\text{He} + n + \text{Energia}$

C) Nesse processo, que radiação, a beta ou a gama, tem

Ocorre a liberação de um nêutron (n). A espécie T deve ter maior velocidade? **JUSTIFIQUE** sua resposta.

A) 2 prótons e 2 nêutrons.

B) 2 prótons e 3 nêutrons. SEÇÃO ENEM FÍSICA

C) 2 prótons e 5 nêutrons. **01.** (Enem-2006) O funcionamento de uma usina nucleoeletrônica

típica baseia-se na liberação de energia resultante

D) 2 prótons e 3 elétrons.

da divisão do núcleo de urânio em núcleos de menor

E) 4 prótons e 3 elétrons. massa, processo conhecido como fissão nuclear.

Nesse processo, utiliza-se uma mistura de diferentes átomos

15. de urânio, de forma a proporcionar uma concentração (UFC-2007) O núcleo de um determinado elemento A,

constituído por dois prótons e dois nêutrons, tem de apenas 4% de material físsil. Em bombas atômicas,

massa $m_A \approx 6,691 \times 10^{-27}$ kg. Medidas experimentais cuja obtenção é trabalhosa, pois, na natureza, predomina ^{238}U são utilizadas concentrações acima de 20% de urânio físsil, mostram que a soma da massa dos dois prótons, o urânio não físsil. Em grande parte do armamento nuclear

$m_{^{235}\text{U}} \approx 3,345 \times 10^{-27}$ kg, com a massa dos dois nêutrons, hoje existente, utiliza-se, então, como alternativa, o plutônio,

$m_{^{239}\text{Pu}} \approx 3,350 \times 10^{-27}$ kg, não é igual à massa do núcleo. ^{235}U material físsil produzido por reações nucleares no interior

Isso significa que existe uma energia mínima necessária do reator

das usinas nucleoeletricas. Considerando-se

para separar os constituintes do núcleo do elemento A, essas informações, é correto afirmar que

denominada aqui de energia de ligação E_L . A) a disponibilidade do urânio na natureza está ameaçada

Dados: constante de Planck $h = 6 \times 10^{-34}$ J.s; devido a sua utilização em armas nucleares.

velocidade da luz no vácuo $c = 3 \times 10^8$ m/s. B) a proibição de se instalarem novas usinas nucleoeletricas

não causará impacto na oferta mundial de energia.

A) **DETERMINE** a energia de ligação para separar

C) a existência de usinas nucleoeletricas possibilita que um prótons e nêutrons em um núcleo do elemento A.

de seus subprodutos seja utilizado como material bélico.

B) No caso de ser possível separar os constituintes D) a obtenção de grandes concentrações de urânio físsil

do núcleo do elemento A, incidindo fótons de é viabilizada em usinas nucleoeletricas.

uma radiação eletromagnética de frequência E) a baixa concentração de urânio físsil em usinas

$f = 1,2 \times 10^{15}$ Hz, **DETERMINE** o número de fótons nucleoeletricas impossibilita o desenvolvimento

necessários para que isso ocorra. energético.

Editora Bernoulli 99

Frente D Módulo 18

02. (Enem–2005) Um problema ainda não resolvido da

geração nuclear de eletricidade é a destinação dos rejeitos

GABARITO

radiativos, o chamado “lixo atômico”. Os rejeitos mais

ativos ficam por um período em piscinas de aço inoxidável

Fixação

nas próprias usinas antes de ser, como os demais rejeitos,

acondicionados em tambores que são dispostos em áreas

01.

C

cercadas ou encerrados em depósitos subterrâneos secos,

como antigas minas de sal. A complexidade do problema 02. B

do lixo atômico, comparativamente a outros lixos com 03. E

substâncias tóxicas, se deve ao fato de 04. B

A) emitir radiações nocivas, por milhares de anos, 05. A) A massa dos 4 átomos de hidrogênio é um

em um processo que não tem como ser interrompido pouco maior que a massa do hélio. A diferença

artificialmente. entre essas massas (Δm) é convertida em

B) acumular-se em quantidades bem maiores do que o energia, segundo a equação $E = \Delta m \cdot c^2$, em

lixo industrial convencional, faltando assim locais para que c é a velocidade da luz.

reunir tanto material. B) $2,7 \times 10^{26} \text{ J/s}$

C) ser constituído de materiais orgânicos que podem

**contaminar muitas espécies
vivas, incluindo os Propostos**
próprios seres humanos.

D) exalar continuamente gases venenosos, que 01. B 04. D 07. D 10.
B 13. B

tornariam o ar irrespirável por milhares de anos. 02. E 05. E 08. C 11.
C 14. A

E) emitir radiações e gases que podem destruir a camada 03. B 06.
D 09. B 12. B

de ozônio e agravar o efeito estufa. 15. A) $E_L = 3,6 \times 10^{-13} \text{ J}$

03. B) 5×10^5 fótons (Enem–2004) O debate em torno do uso da
energia

nuclear para produção de eletricidade permanece atual. 16. A)
Falsa. O intervalo de tempo de 60,4 anos

Em um encontro internacional para a discussão desse corresponde a
dois tempos de meia-vida

tema, foram colocados os seguintes argumentos: do cézio 137.
Assim, após 60,4 anos, ainda

I. Uma grande vantagem das usinas nucleares é o fato restarão 25%
da massa inicial de cézio.

de não contribuir para o aumento do efeito estufa, B) O
decaimento do cézio radioativo pode ser

uma vez que o urânio, utilizado como “combustível”,
expresso pela equação:

II. Ainda que sejam raros os acidentes com usinas não é queimado, mas sofre fissão. $^{137}_{55}\text{Cs} \rightarrow ^{56}_{36}\text{Ba} + ^{81}_{19}\text{K} + \beta + \gamma$

nucleares, seus efeitos podem ser tão graves que a energia liberada, fóton de radiação γ ,

essa alternativa de geração de eletricidade não nos deve-se ao fato de a massa do cézio ser

permite ficar tranquilos. maior que a soma da massa do bário com a

massa da partícula β . A diferença entre essas

A respeito desses argumentos, pode-se afirmar que

massas (Δm) é convertida em energia,

A) o primeiro é válido e o segundo não é, já que nunca 2 segundo a equação $E = \Delta m \cdot c^2$, em que c é a

ocorreram acidentes com usinas nucleares.

velocidade da luz.

B) o segundo é válido e o primeiro não é, pois de fato

C) A radiação gama (γ) é constituída de fótons

há queima de combustível na geração nuclear de

de alta energia e viaja na velocidade da luz,

eletricidade.

superior, portanto, à velocidade da radiação

C) o segundo é válido e o primeiro é irrelevante, pois beta (β), constituída de elétrons.

nenhuma forma de gerar eletricidade produz gases

do efeito estufa. **Seção Enem**

D) ambos são válidos para se compararem vantagens e

riscos na opção por essa forma de geração de energia.

02.

A

E) ambos são irrelevantes, pois a opção pela energia

nuclear está se tornando uma necessidade 03. D
inquestionável.